

LED漁灯の測光と対象種の光感覚に関する研究

著者	岸 彩子
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2008
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000806/

修士学位論文

LED 漁灯の測光と対象種の光感覚に関する研究

平成 20 年度
(2009 年 3 月)

東京海洋大学
大学院 海洋科学技術研究科
博士前期課程 海洋生命科学専攻

岸 彩子

LED漁灯の測光と対象種の光感覚に関する研究

岸 彩子

【目 次】

第1章 緒言	1
第2章 測光	6
2 - 1 イカ釣り漁船の測光	6
2 - 1 - 1 方法	6
i) 供試漁船	6
ii) 測光手順	7
iii) 釣具最下水深の光環境	9
2 - 1 - 2 結果	9
i) 漁場海水の光学的特性	9
ii) 船下および周辺の光環境	10
iii) 釣具最下水深の光環境	12
2 - 2 サンマ棒受網漁船の測光	14
2 - 2 - 1 方法	14
i) 供試漁船	14
ii) 測光手順	15
2 - 2 - 2 結果	16
i) 漁場海水の光学的特性	16
ii) 船体周辺の光環境	18
2 - 3 考察	20
2 - 3 - 1 イカ釣り漁船の船下および周辺の光環境	20
2 - 3 - 2 サンマ棒受網漁船周辺の光環境	22
第3章 漁獲対象生物の光感覚	23
3 - 1 スルメイカの網膜運動反応(水槽実験)	24
3 - 1 - 1 方法	24
i) 実験装置	24
ii) 実験光源	24
iii) 供試スルメイカ	25
iv) 実験条件	26
v) 網膜標本作成方法	27
vi) 解析方法	28

3 - 1 - 2 結果	29
i) 光量・波長別順応度(連続光)	30
ii) 光量・波長別順応度(点滅光)	31
3 - 2 サンマの網膜運動反応(水槽実験)	33
3 - 2 - 1 方法	33
i) 実験装置	33
ii) 実験光源・条件	33
iii) 供試サンマ	34
iv) 解析方法	34
3 - 2 - 2 結果	35
3 - 3 実操業で釣獲したスルメイカの網膜運動反応	37
3 - 3 - 1 サンプリング方法	37
i) LED船上灯を使用した漁船からのサンプリング	37
ii) LED水中灯を使用した漁船からのサンプリング	38
3 - 3 - 2 結果	41
i) 釣獲直後のスルメイカ網膜順応度(6月, 第12白嶺丸, LED船上灯)	41
ii) 釣獲直後のスルメイカ網膜順応度(9月, 白山丸, LED水中灯・MH船上灯)	42
3 - 4 実操業で漁獲したサンマの網膜運動反応	44
3 - 4 - 1 サンプリング方法	44
3 - 4 - 2 結果	45
3 - 5 考察	45
3 - 5 - 1 スルメイカの網膜運動反応	45
3 - 5 - 2 サンマの網膜運動反応	47
 第4章 総合考察	 48
 謝辞	 50
 参考文献	 52
 図表リスト	 55

第 1 章 緒言

日本においてスルメイカとサンマの魚種別漁獲量は上位にあり，毎年両種の大部分がそれぞれイカ釣り，サンマ棒受網漁業により生産されている。¹⁾ イカ釣りとはサンマ棒受網の共通項として灯光を利用して漁獲を行なう点があげられ，²⁾ いずれも産業規模が大きな灯光利用漁業である。³⁾

イカ釣り漁は，1457 年には佐渡で釣りが行なわれていた記録があり，ソクマタ・トンボ（図 1-1）などが用いられていた。⁴⁾ 1 本の釣糸に複数の擬餌針を連結するようになったのは 1950 年代以降であり，1958 年頃には手動イカ釣り機が，1965 年頃には自動イカ釣り機が普及し始めた。⁴⁾

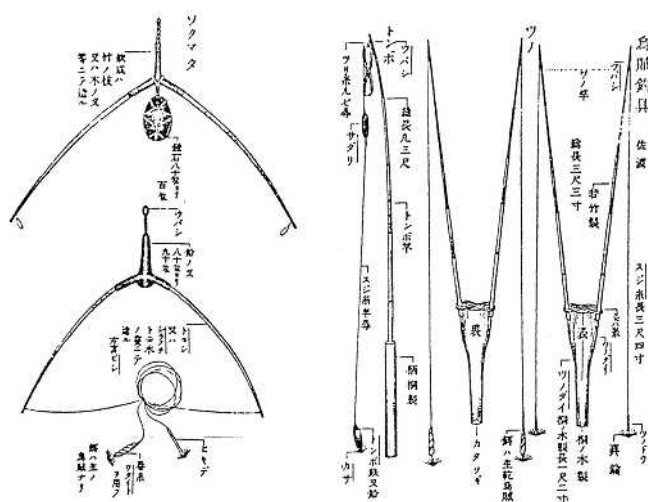


図 1-1 自動イカ釣り機普及以前のイカ釣り具例（ソクマタ(左)とトンボ(右)）⁴⁾

灯火を使った漁に関する記述は万葉集の中にもあり、古代からすでに漁灯漁業が始まっていたことが示されている。⁴⁾ イカ釣り漁業では、近世の後期に松明で海面を照らすかがり火漁があり，その後，石油集魚灯からアセチレン集魚灯を経て，1929 年以降は集魚灯が電化され始めた。⁴⁾ 戦後は，白熱灯が使われていたが，オイルショック以降，ハロゲン灯（図 1-2，図 1-5）が普及し始め，1980 年には現在広く使われているメタルハライド灯（図 1-3，図 1-4）が普及し始めた。⁵⁾ ハロゲン灯は，フィラメントに電流を流して高温に加熱し，その熱放射を利用する白熱電球内部にハロゲンガスを封入したものである。白熱灯と比べ小型・長寿命であり，現在は，大きな光量を必要としない操業時や，作業灯として用いられている。白熱灯やハロゲン

灯の光は可視光の長波長成分と赤外線の発光割合が大きいため、海水中で減衰しやすい。⁶⁾

現在、イカ釣り用漁灯として最も広く普及しているメタルハライド灯は、放電発光管内部に封入する金属ガスによって発光色・光量が変化する。ハロゲン灯よりも水中透過率は格段に高いが、各灯専用の安定器が必要で設備費がかかり、電源を入れてフル点灯状態になるまで10分前後要し、大容量球では瞬時点灯が難しい。^{6,7)}

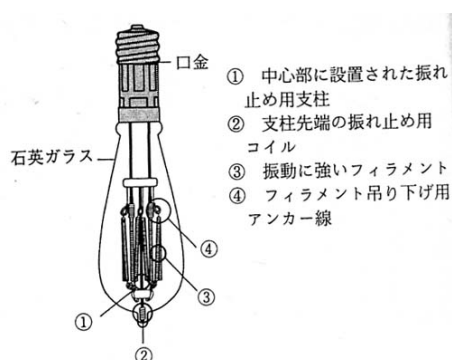


図 1 - 2 ハロゲン灯の構造

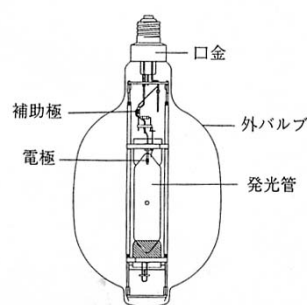


図 1 - 3 メタルハライド(MH)灯の構造



図 1 - 5 ハロゲン灯を点灯した
イカ釣り漁船



図 1 - 4 イカ釣り漁船に装備されている
MH 灯

サンマ漁は 1670 年ごろに八手網を改良したサイラ網漁が考案された。1835 年には伊豆大島でサンマを漁獲対象とした旋網漁業が創始された⁸⁾が、旋網は規模が大きく、また行動範囲や気象条件による制約から漁場が限られていた。⁸⁾ 1905 年にはサンマ流網が出現して、操業効率の向上もあり急速に普及した（図 1 - 6）。

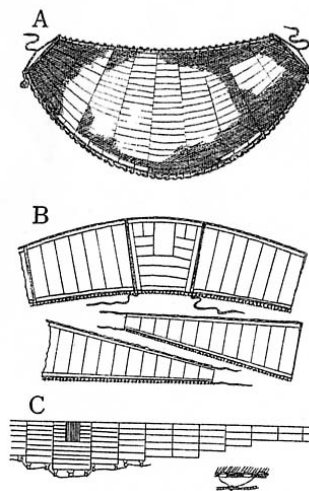


図 1 - 6 サンマ旋網模式図⁸⁾ A:サイラ網, B:サンマ網, C:流し旋網

灯光を利用するサンマ棒受網操業は 1940 年頃に千葉県で実用化され，戦後の 1949 年に多くのサンマ漁船がこの漁法に転換した。⁸⁾ 元々マイワシを漁獲するために使われていた棒受網と漁灯を組み合わせることで操業の能率が上がるとともに漁獲量が増加した。⁸⁾ 現在の棒受網漁業では，漁灯光源には白熱灯やメタルハライド灯が主に使用されている（図 1 - 7）。



図 1 - 7 漁灯を点灯したサンマ棒受網漁船

イカ釣り漁業，サンマ棒受網漁業共に灯光は欠かせない要素であるが，両漁業とも光量増大傾向が続き，その結果，燃油費・電球等の漁灯関連経費の増加による漁業経営の圧迫，⁹⁾ 漁灯使用による排ガス・光害などの環境への影響が問題となっている。¹⁰⁾ また，イカ釣り漁業では光量増大が釣獲水深の深化¹⁰⁾を引き起こす一因となっており，適切な光量と灯光を効果的に利用する操業方法を検討する必要性が指摘されている。¹¹⁾ 適切な灯光の利用

方法を考えるにあたって，(1) 光源の種類および出力と海中の分光放射照度分布との関係，(2) 漁場海水の光学的性質，(3) 海中の光環境とスルメイカやサンマの分布・行動および生理・生態などの関連について解明する必要がある。¹²⁾

本研究では，日本における代表的な灯光利用漁業，イカ釣り，サンマ棒受網の LED 漁灯導入船について測光し，これらの結果をもとに，漁場海水の光学的特性と漁船周辺の配光について調べた。また対象種の網膜運動反応も調べ，灯光利用技術の適正化に向けた指針を得ることを目的とした。

第 2 章では，LED 漁灯導入漁船の測光について記述した。海中の光環境の研究は，漁船周辺の水中照度の実測などが行われてきた。^{13,14)} しかし，これらは，測光量をヒトの比視感度に対応した lx 照度で観測している。海中光の減衰は海水の光学的性質に支配され，波長によって透過率が異なるため，分光放射照度 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$) で計測する必要がある。その後の研究で，分光放射照度を用い，メタルハライド灯の海中分光放射照度分布が明らかにされた。¹⁵⁾ 一方で LED 漁灯について海中の光環境を明らかにした研究はまだ少ない。そこで発光波長の選択や光量調節が容易で燃油節減効果が期待される LED 光源 (<http://www.led.or.jp/index.htm>) について，イカ釣り・サンマ棒受網漁場の光環境を調査した。

第 3 章では対象種の網膜運動反応について記述した。漁灯を利用した操業の漁獲機構の解明や適正な漁灯操法構築のために，網膜運動反応を応用する研究がこれまでにいくつか行なわれてきた。スルメイカを対象として，Inada¹⁶⁾ は網膜桿体細胞中の黒色色素顆粒の移動を指標に，釣獲直後のスルメイカの網膜に天空照度に由来すると考えられる順応度の変化があったとする一方，水槽を用いた露光実験では順応度の変化が観察できなかったと報告している。魚類においては，網膜内の錐体細胞および色素上皮層の移動を指標にゴマサバ¹⁷⁾，マサバ¹⁸⁾，マアジ¹⁹⁾ などで実験がおこなわれ，漁灯下の魚であっても網膜運動反応そのものに日周性があることも報告されている。²⁰⁾ しかし，LED 漁灯に対するスルメイカ・サンマに対する順応度については不明である。本章では，発光波長・光量の設定および調節の自由度が高い LED を用い，水槽内で点灯条件を変化させてスルメイカ・サンマの網

膜運動反応実験を行なった。また、夜間の LED 漁灯下および昼間の天空光下で漁獲された直後のスルメイカとサンマの眼球を採取し、船下の対象種の網膜順応度を求めた。

第 4 章では、測光と網膜運動反応の結果をもとに、LED 使用船の実操業における効果的な漁灯利用方法について考察した。

第 2 章 測光

2 - 1 イカ釣り漁船の測光

イカ釣り漁船周囲およびイカ釣機の釣具操作範囲における , 光源の違いによる分光放射照度分布を調べるため , 測光調査を行なった。

2 - 1 - 1 方法

i) 供試漁船

測光は 2007 年 3 月 15 ~ 16 日に石川県小木沖 ($37^{\circ} 16' N$, $137^{\circ} 17' E$ 図 2 - 1) で行なった。測光対象船は , 小木船籍で実操業に LED 漁灯を試用中の中型イカ釣り漁船 第 12 白嶺丸 (138GT) (図 2 - 2) である。測光当時の白嶺丸は LED 灯を 75kW , メタルハライド灯を 174kW 装備していた。第 12 白嶺丸の灯具配置図を図 2 - 3 , 図 2 - 4 に示した。



図 2 - 1 測光実施場所 ($37^{\circ} 16' N$, $137^{\circ} 17' E$)



図 2 - 2 測光対象船 第 12 白嶺丸

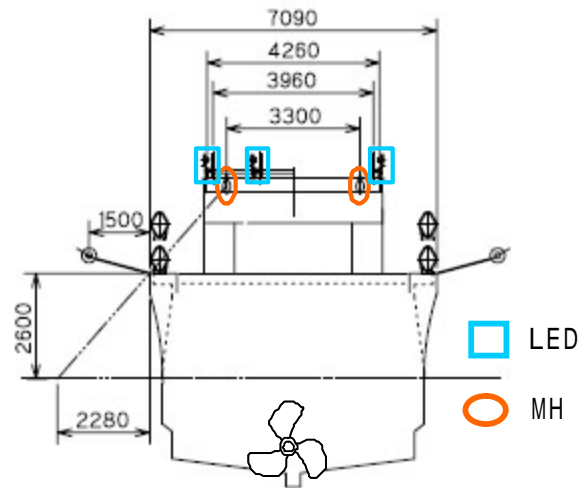


図 2 - 3 第 12 白嶺丸の灯具配置 (船尾から見た船体中央断面図)

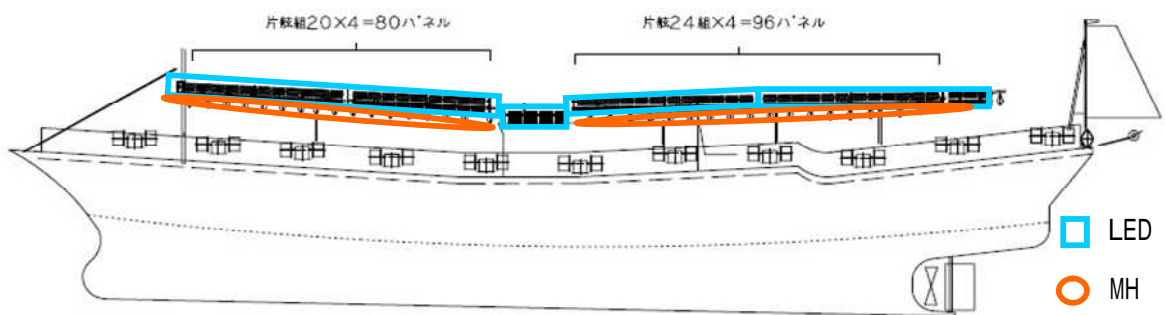


図 2 - 4 第 12 白嶺丸の灯具配置 (左舷側面図)

ii) 測光手順

測光には図 2 - 5 の自由落下方式連続分光(136 波長)水中放射照度および 7 波長マルチ水中放射照度計 (Satlantic 社, Hyperpro_Multi plus) と, 図 2 - 6 の一波長水中光束消散係数計 (WET Labs 社, C Star) を使用した。測器からは 340 ~ 800nm 間の水中分光放射照度・水温・水深・光束透過率・時刻・測器の傾角等のデータを得た。最小測得値は $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ であった。



図 2 - 5 水中分光放射照度計 (Satlantic 社 , Hyperpro_Multi plus)

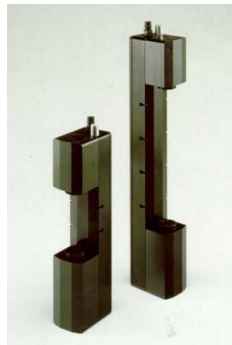


図 2 - 6 水中光束消散係数計 (WET Labs 社 , C Star)

船体周辺測光 小型漁船を測光船とし，測点を設定して計測した（図 2 - 7）。第 12 白嶺丸の左舷中央部と測光船の船首をロープで連結し，測光船の船首から測器を海中に降下し，放射照度を測得できなくなったところで，測器を慎重に引き上げた。第 12 白嶺丸と測光船の距離 20～100m の間で，10m ごとに定位して，測器を降下した。計測中は，風圧・潮流・波浪などの外力により本船と測光船の相対的な測光位置がずれるのを防ぐため，本船および測光船は，機関・舵を適宜使用して測点を保つように努めた。

釣具操作範囲測光 第 12 白嶺丸左舷中央にある自動イカ釣機（図 2 - 4 船首から数えて 5 番目）の前車を介して測器を降下した（図 2 - 8）。と同様，放射照度の波形が表れなくなったところで測器を引き上げた。測定条件は，LED，メタルハライド灯の各単独使用時と，併用時であった。また，の方法で昼間に太陽光の測定も行なった。

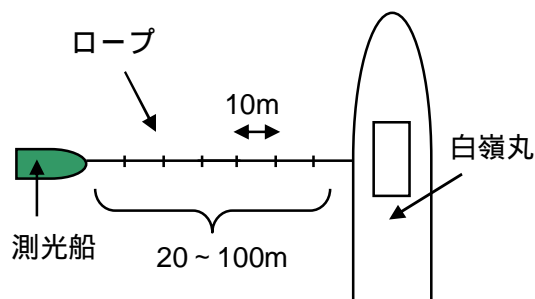


図 2 - 7 船体周辺の測光方法

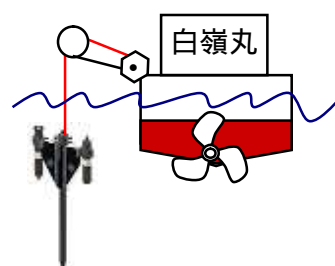


図 2 - 8 釣具操作範囲の測光方法

iii) 解析方法

測器より，条件ごとの海水温・光束透過率・340～800nm 間の波長・水深別の下方向放射照度の値を得た。DAT 形式のファイルの中から，Excel ファイルに変換し，測定値をもとに放射照度のグラフ化や測得水深以深の下方向放射照度値の計算を行なった。

2 - 1 - 2 結果

i) 漁場海水の光学的特性

図 2 - 9 に，今回の測光で得た太陽光の水深別 分光放射照度および分光透過率を示した。縦軸左に放射照度，縦軸右に透過率，横軸に波長を示した。透過率は，海面と水深 10m の放射照度値より算出した。グラフより，海面上で測定した太陽光は，短波長から長波長側まで放射照度が確認されたが，海中に入ると 600nm より長波長の光の放射照度が著しく減衰し，海面から水深 10m の間で 90% 以上の光が消散していた。また，測光実施海域では 450～550nm の波長域の光が海水中に透過しやすいことが確認された。

図 2 - 10 に測光時の漁場の水温・光束透過率（濁度指標）の鉛直分布を示した。光束透過率は，水深 50m 以浅では昼間より夜間の値が高く，やや澄んでいたことがわかった。昼間，水深 60m と 100m 付近に光束透過を遮るスパイクが観測されたが，水温は水深 5～150m まで 11.2 でほぼ一定であった。

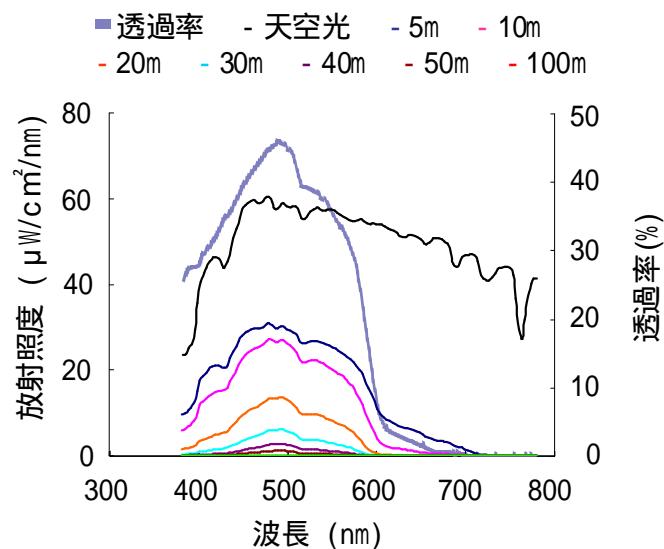


図 2 - 9 太陽光 水深別分光放射照度および透過率
(2007 年 3 月 15 日 14:00 晴 37° 16' N, 137° 17' E)

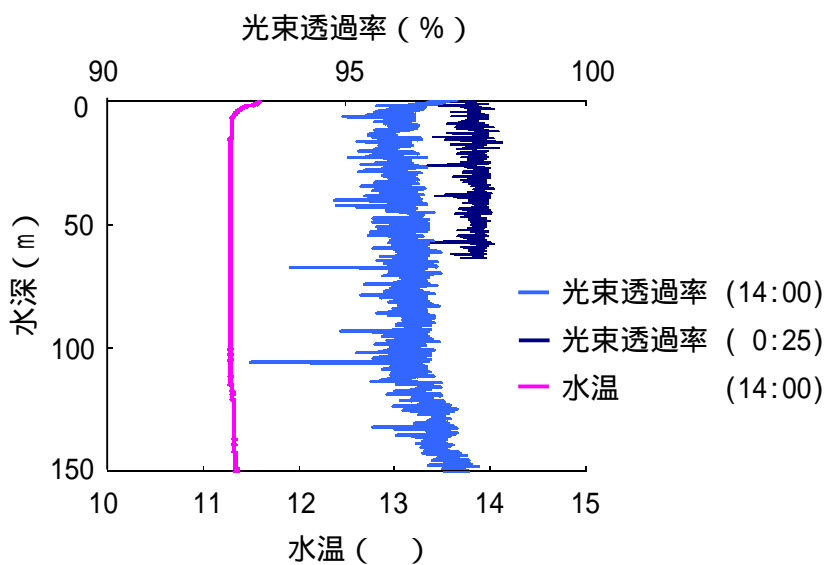


図 2 - 10 測光実施海域の水温および光束透過率

ii) 船下および周辺の光環境

図 2 - 11 に LED, メタルハライド灯それぞれの水深 5m における分光放射照度を示した。測光位置は第 12 白嶺丸左舷正横 30m であった。縦軸は放射照度, 横軸は波長を表している。LED は, 海水に透過しやすい 450~550nm の範囲に発光波長のピークがあり, また手元の作業用に 500~650nm の発光波長を選択しているため, 漁灯を点灯した際は図 2 - 12 のような外観であっ

た。一方メタルハライド灯は、点灯すると図 2 - 13 のように白色に見えるが、400 ~ 600nm の間に発光波長のピークが 7 つほど確認できた。

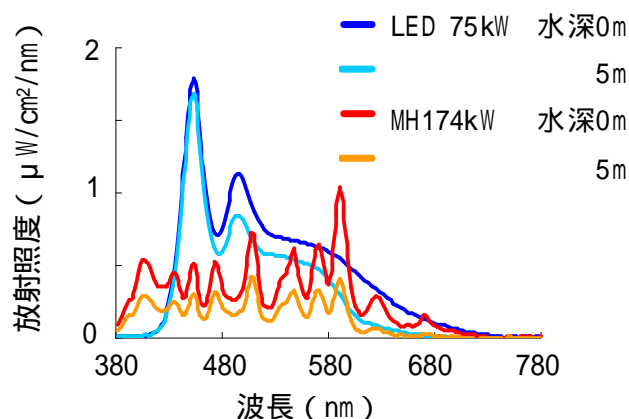


図 2 - 11 光源別 水中分光放射照度
(第 12 白嶺丸 左舷中央から 30m)



図 2 - 12 LED 漁灯を点灯した
第 12 白嶺丸



図 2 - 13 MH 漁灯を点灯した
第 12 白嶺丸

船周辺の配光を図示するため、各水深の放射照度を可視光の範囲(380 ~ 780nm)で積分した値が、第 12 白嶺丸と測光船、2 船間の距離によってどのように変化するかを図 2 - 14、図 2 - 15 に示した。縦軸に水深、横軸に第 12 白嶺丸舷側からの距離を示した。図 2 - 14 の LED75kW 点灯時は、 $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値が確認できた最も深い水深は 52.3m であった。(第 12 白嶺丸からの距離 30m)。 $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値は第 12 白嶺丸舷側から 30m の位置で水深 28m に達していた。図 2 - 15 のメタルハライド灯 174kW 点灯時は、 $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値を確認できた最も深い水深は 46.6m (白嶺丸からの距離 40m) であった。 $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値は第 12 白嶺丸舷

側から 60m の位置で水深 7m まで達していた。また，第 12 白嶺丸の舷側から 100m の位置で $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ を観測した水深は，LED 使用時には 5.1m であったのに対し，メタルハライド灯使用時は水深 8.3m であった。釣具操作範囲の測光では，LED は水深 34m まで $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の光が届いていたのに対し，メタルハライド灯は水深 13m であった（図 2 - 14，図 2 - 15）。

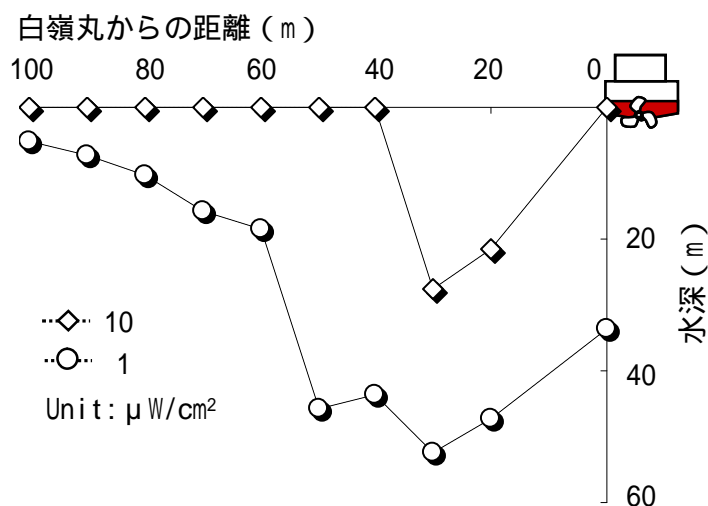


図 2 - 14 LED75kW 点灯時の船周辺の配光 (第 12 白嶺丸左舷正横方向)

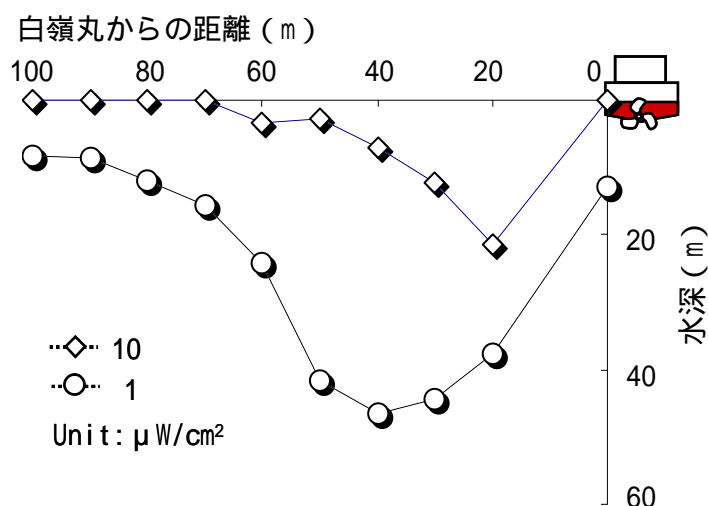


図 2 - 15 MH174kW 点灯時の船周辺の配光 (第 12 白嶺丸左舷正横方向)

iii) 釣具最下水深の光環境

釣具操作範囲における水中分光放射照度の測得可能水深は，LED75kW では水深 36m，メタルハライド灯 174kW では水深 13m であった（図 2 - 16）。

しかし，第 12 白嶺丸は集魚作業時の釣具最下水深を，60m 以深に設定している（図 2 - 17）。そのため，測得不可能水深の放射照度積分値を以下の計算式より求めた。²¹⁾

$$K = \frac{2.3}{z} \times \log \frac{H(u)}{H(l)}$$

K ：消散係数 $H(u)$ ， $H(l)$ ：上層下層の放射照度 z ：上下2層の差(m)

LED とメタルハライド灯の計算値と，太陽光の実測値を図 2 - 18 に示した。図 2 - 18 より，水深 60m における放射照度積分値は，LED75kW で $0.32\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，メタルハライド灯 174kW で $0.21\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，太陽光で $38.9\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。また，水深 80m では LED75kW で $0.22\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，メタルハライド灯 174kW で $0.16\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，太陽光で $6.96\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。

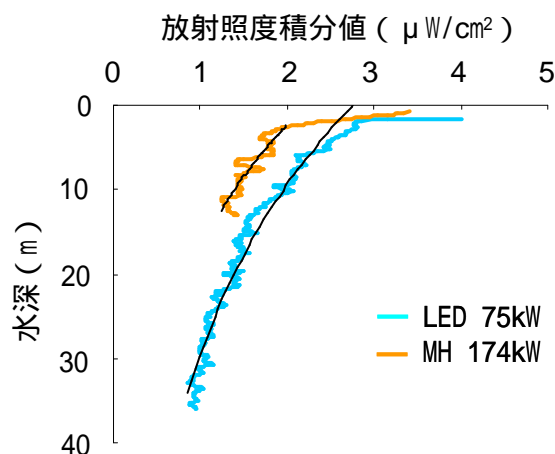


図 2 - 16 釣具操作範囲の放射照度積分値 (積分範囲 380 ~ 780nm)

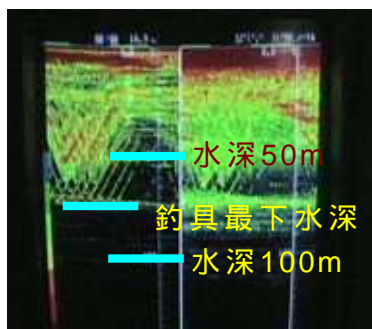


図 2 - 17 魚群探知機で見た釣具最下水深 (2008 年 6 月 8 日 0:08)

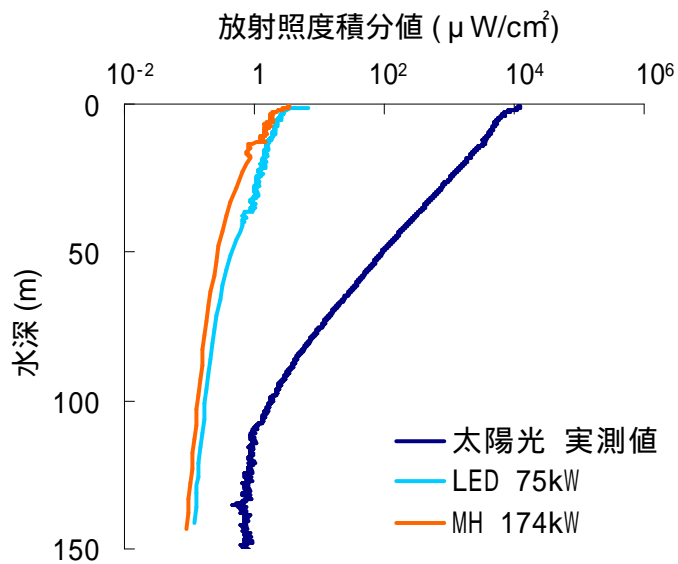


図 2 - 18 光源別 釣具操作範囲の放射照度積分値
(積分範囲 : 380 ~ 780nm)

2 - 2 サンマ棒受網漁船の測光

2 - 2 - 1 方法

i) 供試漁船

測光は 2005 ~ 2008 年の 8 月に宮城県気仙沼沖で行なった。各年の実施日，実施緯度経度を表 2 - 1 に，2008 年実施海域の地図を図 2 - 19 に示した。測光対象船は，長崎船籍で実操業に LED 漁灯を使用中の大型サンマ棒受網漁船 第 1 太喜丸 (133GT) (図 2 - 20) である。各年の装備漁灯と最大出力数を表 2 - 2 に示した。

表 2 - 1 測光実施日および位置

年	月日	位置	
2005	8/11 ~ 12	38° 49' N	141° 42' E
2006	8/12 ~ 13	38° 49' N	141° 43' E
2007	8/11 ~ 12	39° 48' N	141° 39' E
2008	8/ 9 ~ 10	39° 48' N	141° 35' E



図 2 - 19 測光実施場所 (2008 年 8 月 9 日 39°38' N, 141°35' E)



図 2 - 20 測光対象船 第 1 太喜丸

表 2 - 2 第 1 太喜丸 各年の装備漁灯と最大出力

年	最大出力 (kW)				
	2004	2005	2006	2007	2008
XSL	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
INC	533.0	420.0	-	-	-
MH	75.0	74.0	74.0	-	-
LED	-	8.1	50.4	65.6	43.8
合計	628.2	522.3	144.6	85.8	64.0

XSL...キセノンサーチライト，INC...白熱灯

ii) 測光手順

太喜丸の船体周辺の測光は，2 - 1 - 1 ii)の と同様の方法で行なった。測光は左舷親竿下，右舷，船首の 3 方向の測光ラインを設定して，10 または 20m 間隔で実施した（図 2 - 21）。

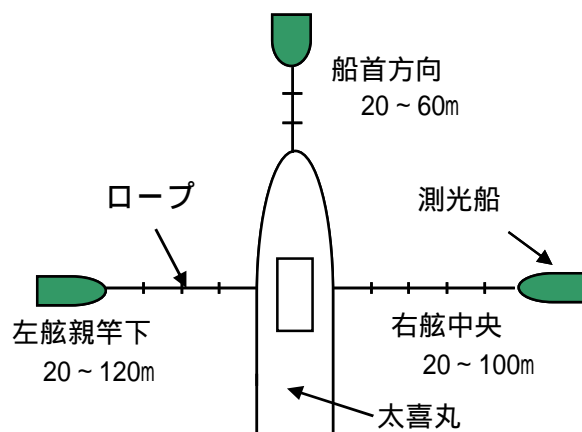


図 2 - 21 第 1 太喜丸 船体周辺の測光位置

2 - 2 - 2 結果

i) 漁場海水の光学的特性

図 2 - 22 に，2007 年の測光で得た太陽光の水深別 分光放射照度および分光透過率を示した。透過率は水深 0m と 10m の放射照度値より求めた。図 2 - 22 より，測光実施海域では 450～550nm の波長が海水中に透過しやすく，600nm より長波長側は海中で著しく消散することが確認された。

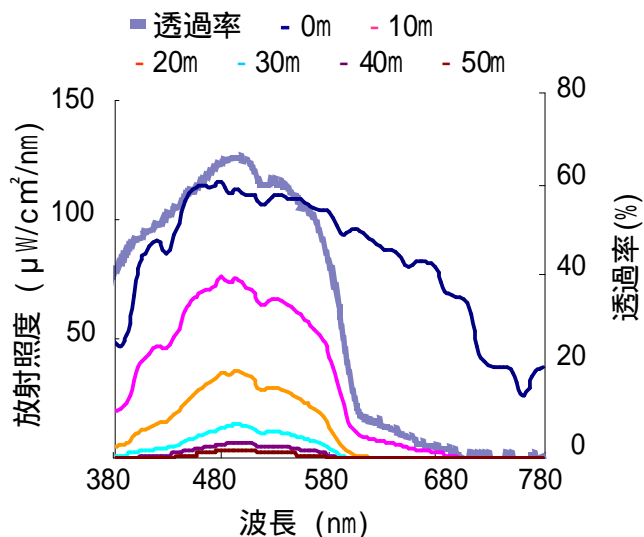


図 2 - 22 太陽光 水深別分光放射照度および透過率

(2007 年 8 月 11 日 14:00 晴 39°46' N, 141°39' E)

図 2 - 23～図 2 - 25 に，2005，2006，2008 年の漁灯測光時の，光束透過率および水温の鉛直分布を示した。2005 年 21 時 12 分に測った光束透過率は，

水深 30m 付近に躍層があり，30m 以浅では光束透過率が 90～95%であったのに対し，30m 以深では 95%以上になっていた。水温は，表層で 20.2℃，水深 30m で 15.2℃であった（図 2 - 23）。2006 年は，水深 13m 付近に光束透過を遮るスパイクが観測されたが，水面から水深 40m まで 92%でほぼ一定の光束透過率であった（図 2 - 24）。2008 年は，水深 10～40m にいくつかのスパイクが観測された。また，2005，2006 年と比べ光束透過率は高くなっていた。水温は，光束透過率のスパイクの位置に対応した水温躍層があり，海面と水深 40m で 5℃近くの降温を確認した（図 2 - 25）。

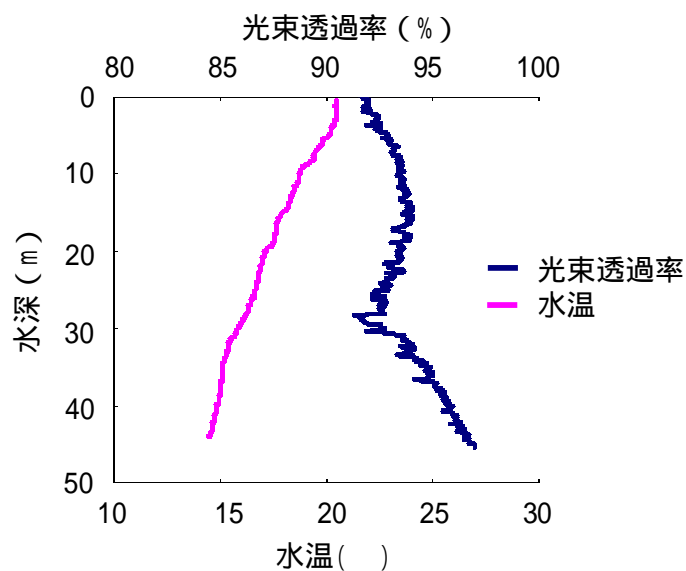


図 2 - 23 INC,MH,LED 全点灯中の光束透過率および水温 (05 8/11 , 21:12)

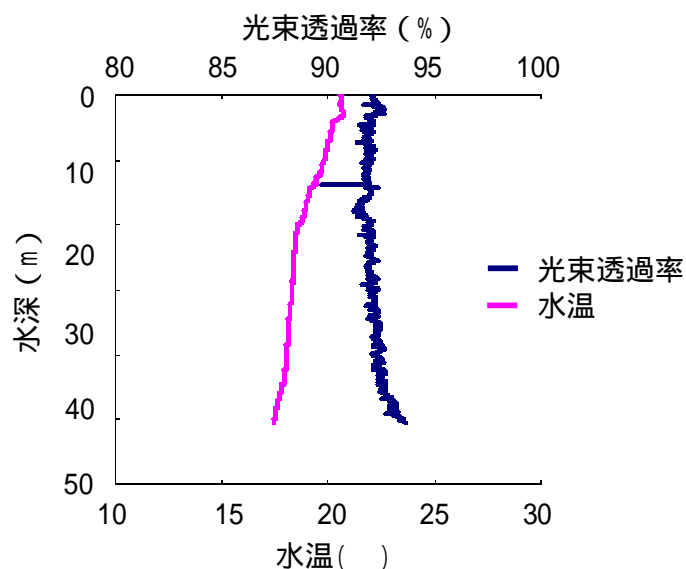


図 2 - 24 MH,LED 全点灯中の光束透過率および水温 (06 8/12 , 20:36)

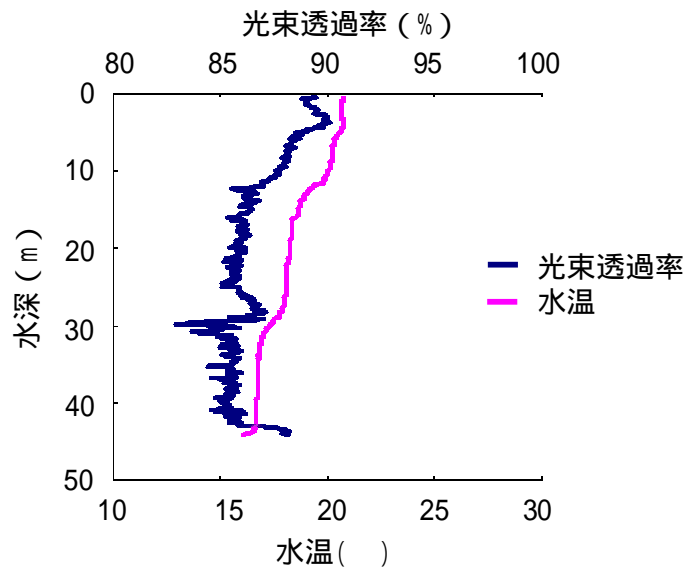


図 2 - 25 LED 全点灯中の光束透過率および水温 (08 8/9 , 23:22)

ii) 船体周辺の光環境

図 2 - 26 ~ 図 2 - 28 に , 2005 , 2006 , 2008 年の全灯点灯時 (探照灯を除く) の測光結果を示した。図は全て左舷 (漁獲舷) 正横方向 20m で測光したものである。LED 全灯点灯のグラフ (図 2 - 28) は , LED100%出力時のデータが測得できなかったため , LED 全灯・出力 60% のデータに 10/6 を積算した。

図 2 - 26 , 図 2 - 27 より , 2005 , 6 年共に緑色メタルハライド灯の発光波長の成分である 537nm にピーク値がみられ , 2005 年は他に白熱灯の長波長成分が確認できた。2006 年は 537nm の他に LED 灯の発光波長成分の 453nm 付近と , 赤灯の 638nm 付近にピーク値がみられた。図 2 - 28 では , LED 灯の主波長 453nm にピークがあった。

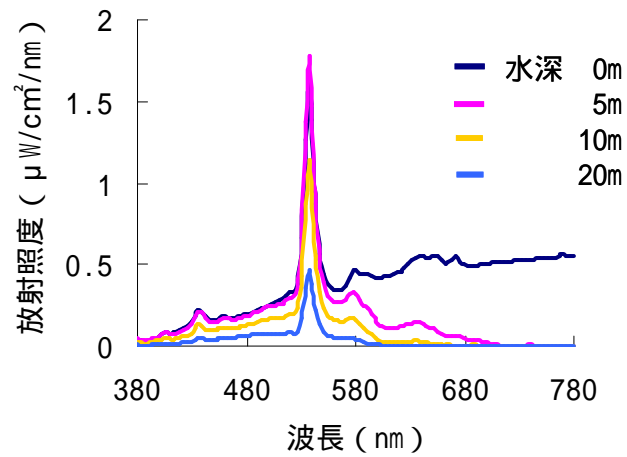


図 2 - 26 水深別 水中分光放射照度

(INC+MH+LED 計 502.1kW 2005, 左舷から 20m)

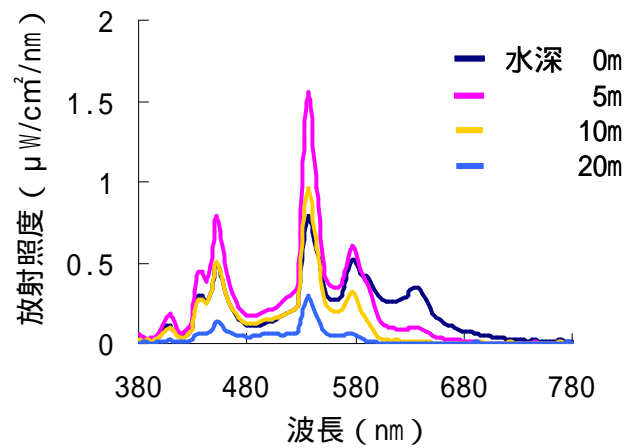


図 2 - 27 水深別・水中分光放射照度

(MH+LED 計 124.4kW 2006, 左舷から 20m)

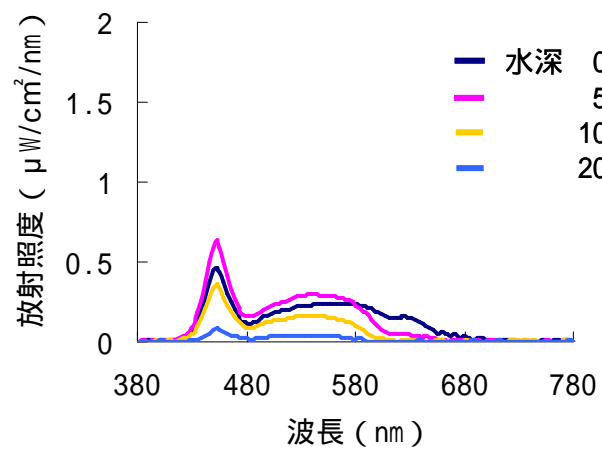


図 2 - 28 水深別・水中分光放射照度

(LED 43.8kW 2008, 左舷から 20m)

第 1 太喜丸周辺の配光を図示するため，各水深の放射照度を可視光の範囲 (380～780nm) で積分した値が，第 1 太喜丸と測光船，2 船間の距離が遠くなるにつれてどのように変化するかを図 2 - 29 に示した。縦軸が水深，横軸左方向が第 1 太喜丸左舷からの距離を，横軸右方向が右舷からの距離を表している。図より，白熱灯とメタルハライド灯を装備していた 2005 年と，メタルハライド灯と LED 装備をしていた 2006 年は左舷・右舷ともに水深 60m 付近まで $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値が確認できた。LED のみを装備していた 2008 年では， $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値を確認できた水深は 30m 付近までであったが，2005，6 年と比べ左右両舷正横方向の 100m 以遠でも放射照度値を測得できた。

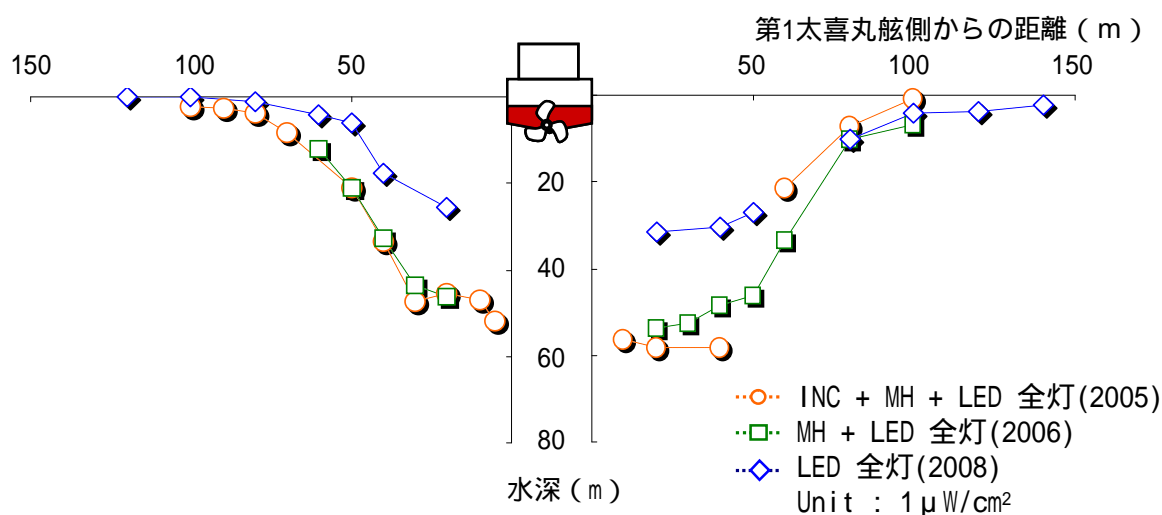


図 2 - 29 漁灯種類別，第 1 太喜丸周辺の配光 (積分範囲 : 380～780nm)

2 - 3 考察

2 - 3 - 1 イカ釣り漁船の船下および周辺の光環境

測光実施海域において，海中に透過しやすい発光波長は 450～550nm であった (図 2 - 9)。イカ釣り用の LED 漁灯はこの範囲内に発光波長のピークがあり，指向性の高い配光設計であったため，釣具操作範囲において従来のメタルハライド灯の測得可能水深が 13m 前後であったのに対し，LED は水深 34m 付近まで測光器で測ることができた (図 2 - 16)。2 - 1 - 2 の灯具装備条件における，本船の周辺の配光は，本船近傍で LED 点灯時の方がメタルハラ

イド灯点灯時と比べて、 $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の放射照度積分値を示した水深が深くまで達していた。一方、本船舷側より50m以上離れた位置ではLEDよりもメタルハライド灯点灯時の測得水深が深かった(図2-14, 図2-15)。釣具操作範囲においては、メタルハライド灯よりLEDの方が $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値を示した水深が深かった(図2-14, 図2-15)。これまでの対光行動実験で、スルメイカが照射域近くの遮光域に集まることが明らかにされており、²²⁾ また光量の水平方向の広がりによる蛸集行動への影響が釣獲につながるといふ指摘もある。¹⁵⁾ このことから、LEDの入射角を大きくし、釣具操作範囲に陰影部ができるようLEDの配光を調節した方が釣獲に結びつく場合があるものと考えられた。実際に本測光結果に基づき、舷側近傍への照射量を減らすため、LEDの設置位置を舷側より内側に移動するなどの改良を行なったところ、釣獲向上が確認された。

スルメイカの釣獲層の放射照度積分値を算出するに当たり、測光当日の海水の水温と光束透過率のプロファイル(図2-10)を参考とした。光は海中に入ると溶存物質や懸濁物質によって吸収・散乱を繰り返して伝搬する。²³⁾ ²⁴⁾ この過程で海中光は吸収・散乱により減衰するが、この減衰率を消散係数と呼ぶ。²³⁾ 溶存物質と懸濁物質の濃度は消散係数に大きな変化ももたらし、波長特性も変えることがある²³⁻²⁵⁾。図2-10より、測光当日の海水が光学的にほぼ一様であることを確認し、この計測に使用した測器では測得不能なスルメイカ釣獲層の放射照度積分値を算出した。その結果、3月15日の測光実施海域における水深80mの放射照度積分値は、LED使用時で $0.22\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、MH灯使用時で $0.16\mu\text{W}/\text{cm}^2$ となった。しかし、本測光の実施時期、実施海域は実際の操業時期、操業海域とは異なっているため、実操業における釣獲層の光量とは差異があり、これらの値は1つの指標として扱う必要がある。LED測光時の水深10mと20mにおける放射照度値を用い、波長480nmの消散係数を求めたところ、 0.01m^{-1} であった。一方、第12白嶺丸の主な操業場所である大和堆の消散係数は $0.08 \sim 0.09\text{m}^{-1}$ である²⁶⁾ ことから、操業船下のスルメイカは、 $0.1 \sim 0.2\mu\text{W}/\text{cm}^2$ よりも低照度の環境で疑餌針を認識し、捕捉などの行動を起こしているものと推察された。

2 - 3 - 2 サンマ棒受網漁船周辺の光環境

測光実施海域では、イカ釣り漁船測光時と同様、450～550nm の発光波長が海水に透過し易いことを確認した（図 2 - 22）。また、600nm よりも長波長側の光は海水中で著しく減衰した（図 2 - 22）。発光波長の主な成分が長波長側である白熱光源は、海面付近において 580nm より長波長の赤色光および赤外線放射照度が $0.5\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ であったが、水深 10m 以深では $0.01\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ 未満まで減衰していた（図 2 - 26）。また、メタルハライド灯を装備していた 2005、2006 年は、発光波長のピーク値、可視光範囲の積分値ともに 2008 年よりも大きく、本船から水平距離 50m の位置までは LED 光よりも深い水深まで $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値が確認できた（図 2 - 29）。一方 2008 年度に装備した LED は、メタルハライド灯や白熱灯と比べ水平方向でより遠くまで $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の放射照度積分値が確認できたことから（図 2 - 29）、LED 漁灯は本船から離れた位置にいるサンマの誘集にも効果が期待できるものと考えられる。また、実操業において、サンマ群は主に水深 20m 以浅で遊泳していることを魚群探知機によって確認しており、配光制御が容易な LED は、メタルハライド灯、白熱灯よりも低出力で広範囲のサンマも誘集できるものと予想される。この結果から、漁業用灯光として LED 光源は従来光源と同等、もしくはそれ以上の役割を果たすことも考えられる。

第 3 章 漁獲対象生物の光感覚

海に棲む無脊椎動物の中で、頭足類は精巧なカメラ眼を持ち、視覚が高度に発達している。^{5,27)} 光を捉える網膜は 4 層に分かれており、表層から順に感桿層、黒色色素層、視細胞核層、神経線維層（図 3 - 1）となっている。²⁷⁾ 桿体内の黒色色素顆粒は、露光に応じて網膜表面へ移動し、感桿層を包んで順応状態を調節する。²⁷⁾

一方、魚類の網膜は、色素上皮層・視細胞層など 10 層よりなり（図 3 - 2）、視細胞層に存在する桿体細胞と錐体細胞の位置の入れ替わりにより順応状態を調節している。²⁸⁾

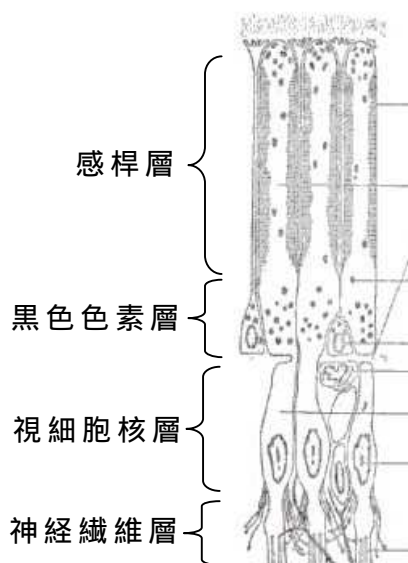


図 3 - 1 スルメイカの網膜構造 模式図

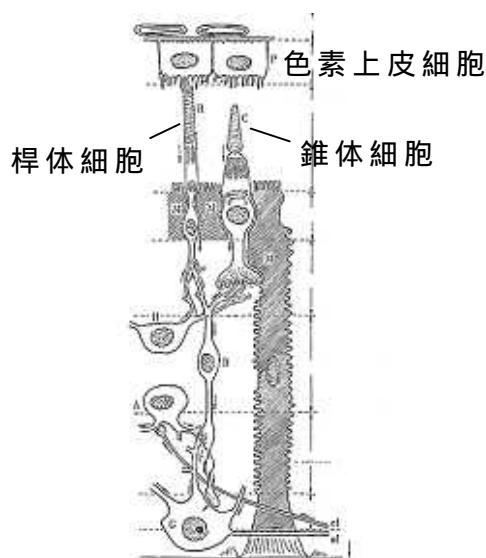


図 3 - 2 魚類の網膜構造 模式図

スルメイカは露光に応じた黒色色素顆粒の移動、サンマでは桿体細胞と錐体細胞が移動する現象を網膜運動反応と呼び^{29,30)}、順応度を算出する指標とした。

本章では、水槽内で暗環境に馴致したスルメイカおよびサンマに、所定の発光色（波長）・光量に設定した LED 光を照射し、網膜運動反応の変化を調べた。また、実操業で漁獲されたスルメイカ・サンマの順応度を調べることで、前章の漁場の光環境におけるスルメイカとサンマの露光履歴の推定を試みた。

3 - 1 スルメイカの網膜運動反応(水槽実験)

スルメイカの網膜運動反応に関する水槽実験は 2007 年 10 月 2～24 日 , 北海道函館市漁港に隣接する暗室 (北大院水付属施設) 内で行なった。

3 - 1 - 1 方法

供試スルメイカを , 遮光した実験水槽で日没後 2 時間以上暗環境に馴致して実験開始に備えた。光源点灯前に , 暗順応状態であるかを確認するためにスルメイカ 1 尾を水槽から取り出し , 眼球を摘出して直ちにブアン液で固定した。その後 , 実験条件別に光を照射し , 5 分または 10 分毎に 60 分間 , 水槽からスルメイカを 1 尾ずつ取り出し , 摘出直後の眼球をブアン液で固定した。固定後 , 摘出個体の外套長・眼球重量・無眼重量を計測した。

i) 実験装置

実験には , 内部を黒色に塗装した FRP 水槽 (80×120×50cm) を使用した。外部の光を遮光するため水槽を遮光幕で覆い (図 3 - 3) , その中央頂点に光源を設置した (図 3 - 4)。また , 水槽内部はスルメイカの共食いを防ぐため , ネットで 4 区画に区切った (図 3 - 4)。



図 3 - 3 遮光した FRP 実験水槽

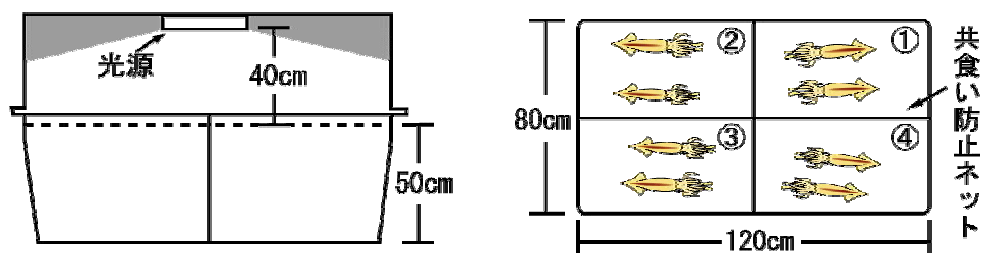


図 3 - 4 実験水槽内部の仕様 (左 : 水槽の寸法 , 右 : 区画設定方法)

ii) 実験光源

水槽実験には , LED (シャープ , GM5WA06270A) 素子を 3×10 個配列した

光源(図 3 - 5)を使用した。発光色は赤(R,主波長 623nm),緑(G,517nm),青(B,463nm),白(W=R+G+B)を使用した。光量は LED の点灯個数を 3・15・30 個と変えることで調節した(図 3 - 5)。図 3 - 6 に使用光源の分光放射照度,放射照度積分値(積分範囲:380~780nm)を示した。図 3 - 7 より,各発光波長の間で積分値に大きな差がないよう設定した。

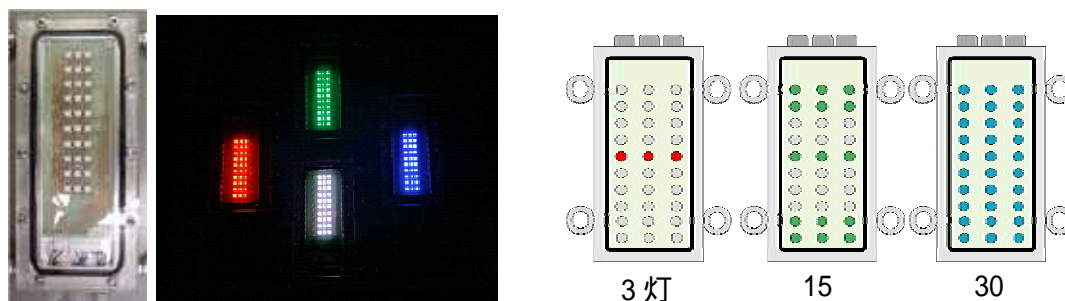


図 3 - 5 LED 光源パネル(左)と光量の調節方法(右)

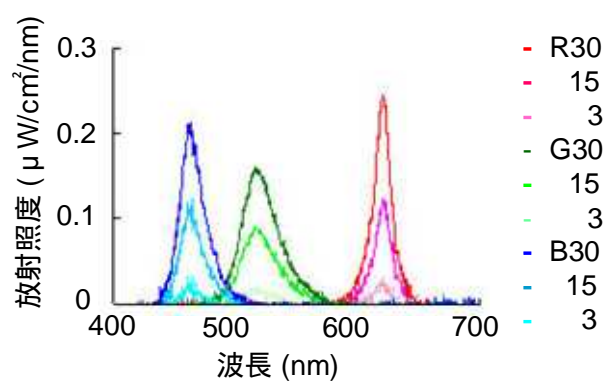


図 3 - 6 実験用 LED の発光波長

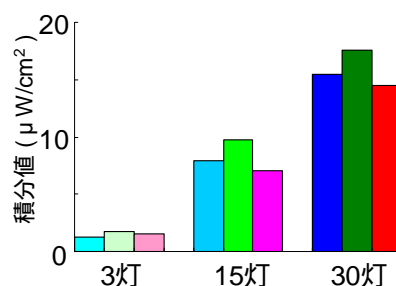


図 3 - 7 発光色別 実験用 LED の放射照度積分値(積分範囲:380~780nm)

iii) 供試スルメイカ

実験に使用したスルメイカは, 朝, 帰港した小型イカ釣り漁船「豊進丸

(9.7t)」の活イカ水槽から、移送用タンクへ海水とともに速やかに移し、実験室内の大型水槽に10分以内で移送した。日没までは蛍光灯下で馴致し、日没後実験開始2時間前に図3-3の実験水槽にスルメイカを移した。移す際に、スルメイカを氷温麻酔し、網膜運動反応を精査するために右眼(図3-8)の角膜と虹彩を取り除いた(図3-9)。これは、スルメイカの角膜及び虹彩が光量に応じて網膜への入光量を調節する機能を有す²⁷⁾ためである。

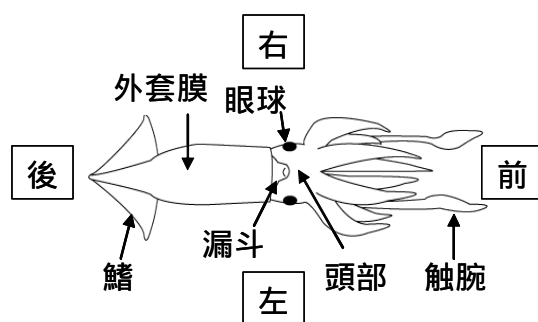


図3-8 スルメイカの各部位の名称

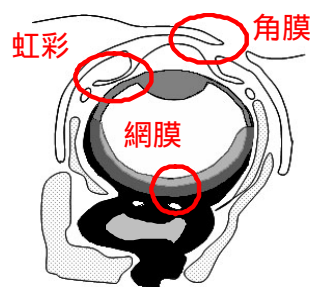


図3-9 角膜・網膜の除去方法(左)、スルメイカ眼球の構造(右)

iv) 実験条件

実験は表3-1～表3-4に示した条件で行なった。

表3-1 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩有, 連続光

発光色	光量	回数
R	30	2
G	30	2
B	30	2
W	30	2

表 3 - 2 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩無，連続光

発光色	光量	回数
R	30	3
	15	2
	3	3
G	30	3
	15	3
	3	3
B	30	3
	15	3
	3	3
W	30	2
	15	2
	3	2

表 3 - 3 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩有，点滅光

発光色	光量	点滅周期	回数
R	30	1Hz	1
G	30	1Hz	1
B	30	1Hz	1

表 3 - 4 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩無，点滅光

発光色	光量	点滅周期	回数
R	30	1Hz	2
	15	1Hz	2
	3	1Hz	1
G	30	1Hz	3
	15	1Hz	4
	3	1Hz	3
B	30	1Hz	3
	15	1Hz	3
	3	1Hz	2

v) 網膜標本作成方法

採集した眼球サンプルは，図 3 - 10 に示すように 6 μ m 網膜縦断切片を切出し，エオシン・ヘマトキシリン染色標本として光学顕微鏡で検鏡した。

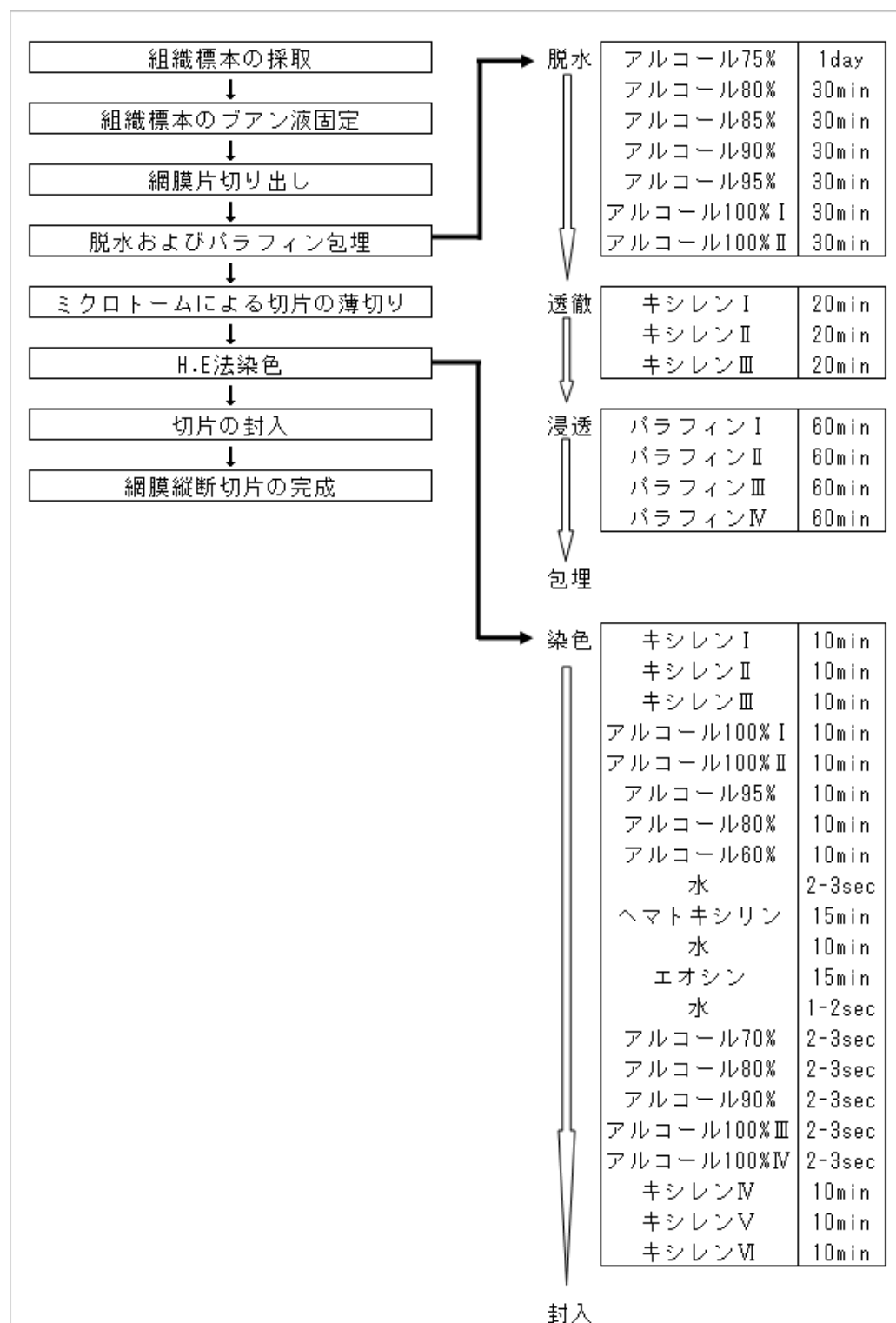


図 3 - 10 網膜縦断切片 作成過程

vi) 解析方法

スルメイカの黒色色素顆粒層上端の，境界膜と網膜表面間の移動距離（図 3 - 11，図 3 - 12）を元に，光に対する順応度を求めた。暗順応の時は境界膜

上に黒色色素の層があり（図 3 - 11）、光を受けると黒色色素顆粒が網膜表面側へ移動し（図 3 - 12）、明順応状態となる（図 3 - 13）。このスルメイカの網膜運動反応の定量指標として、光に対する順応度を以下の式（ ）から求めた。

$$\text{順応度（\%）} = \left(\frac{B}{A} \right) \times 100 \quad \dots \text{（ ）}$$

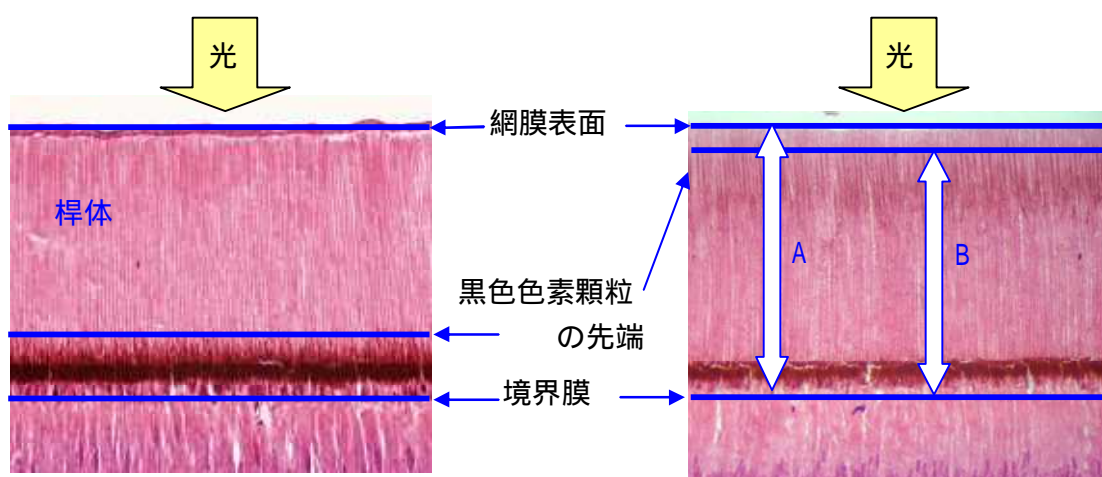


図 3 - 11 暗順応状態のスルメイカ網膜縦断面

図 3 - 12 明順応へ移行中のスルメイカ網膜縦断面

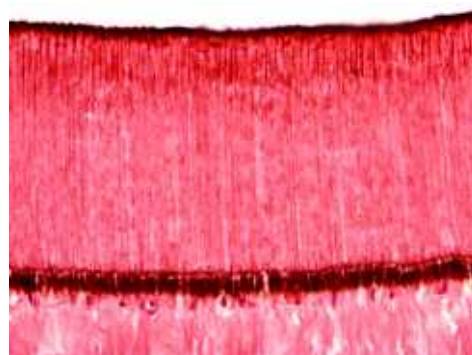


図 3 - 13 明順応状態のスルメイカ網膜縦断面

3 - 1 - 2 結果

実験開始の際、光源点灯前に 2 時間以上暗環境に馴致したスルメイカをサンプリングした。この暗順応状態のスルメイカ 40 個体の順応度は、平均 16.3% であった。

i) 光量・波長別順応度(連続光)

図 3 - 14 に , R 光 30 灯に対する , 右眼の虹彩有無による順応度の結果を示した。また , 図 3 - 15 に R 光の光量別に右眼の虹彩を除去したスルメイカの順応度の経時変化を示した。R 光では , 虹彩の有無による順応度の差は見られず , 虹彩の遮光機能を確認できなかった。また , 光量の差による順応度の違いも見られず , この実験条件の範囲ではスルメイカは順応度に変化は確認できなかった。G , B , W 光に対しても , R 光と同様 , 虹彩の有無による順応度の差はなく (図 3 - 16 , 図 3 - 18 , 図 3 - 20) , この実験条件では光量の差による順応度の違いは見られなかった (図 3 - 17 , 図 3 - 19 , 図 3 - 21)。

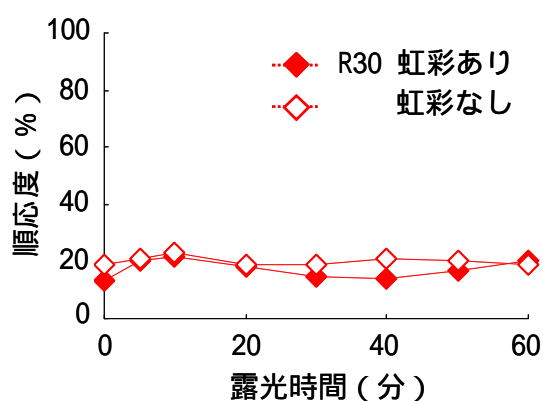


図 3 - 14 虹彩の有無別

R30 光に対する網膜順応度

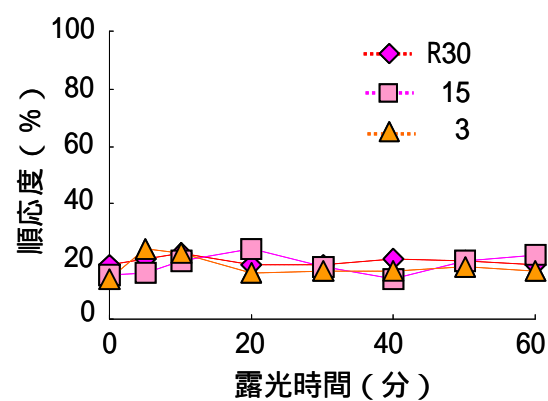


図 3 - 15 虹彩除去個体の R 光に対する

網膜順応度

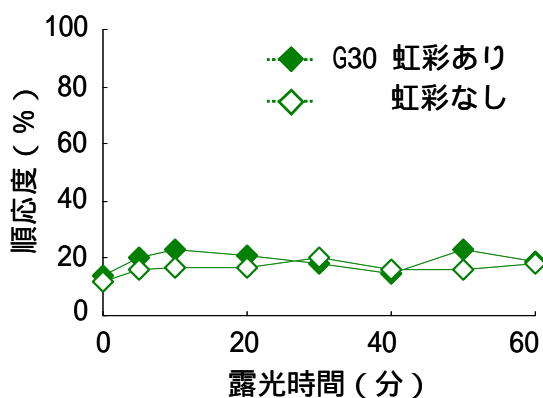


図 3 - 16 虹彩の有無別

G30 光に対する網膜順応度

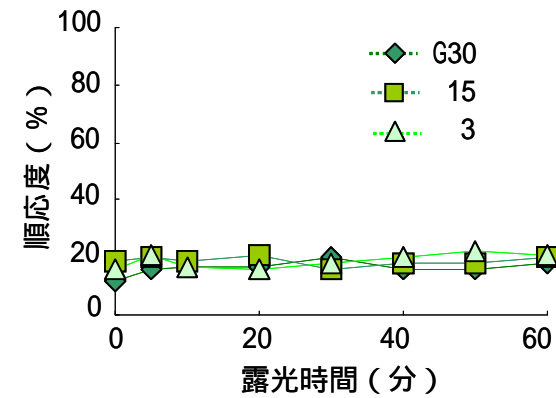


図 3 - 17 虹彩除去個体の G 光に対する

網膜順応度

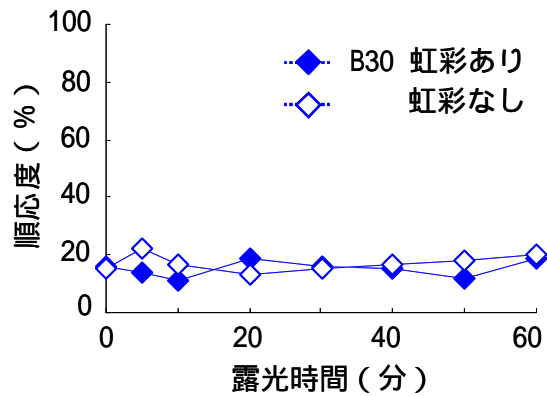


図 3 - 18 虹彩の有無別
B30 光に対する網膜順応度

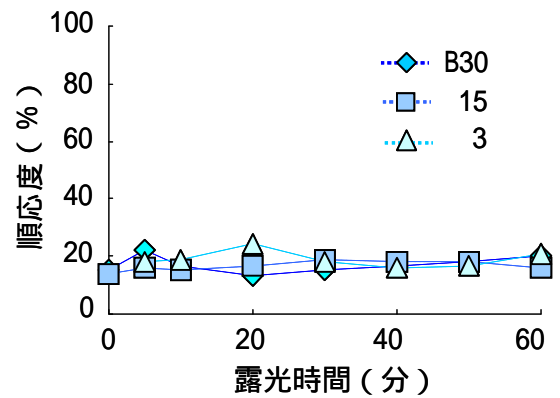


図 3 - 19 虹彩除去個体の B 光に対する
網膜順応度

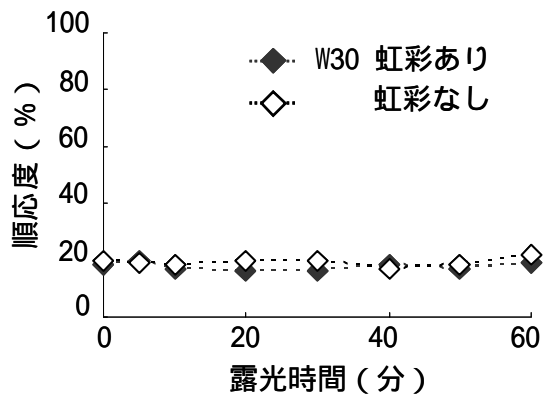


図 3 - 20 虹彩の有無別
W30 光に対する網膜順応度

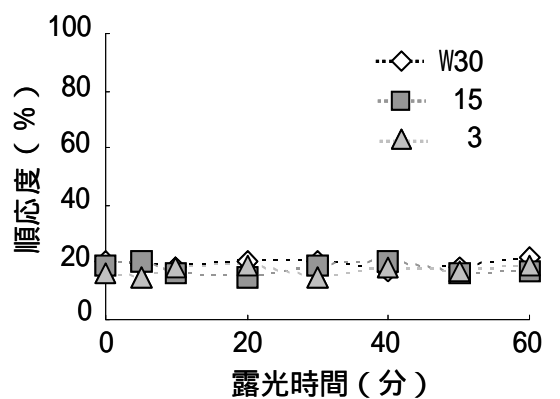


図 3 - 21 虹彩除去個体の W 光に対する
網膜順応度

ii) 光量・波長別順応度 (点滅光)

図 3 - 22 に R 点滅光 30 灯に対する，虹彩を除去しなかった個体の順応度の変化を示した。また，図 3 - 23 に R 点滅光の光量別，右眼の虹彩を除去した個体の順応度の変化を示した。

点滅光に対する網膜運動反応も，連続光と同様に，この実験条件の範囲においては虹彩の有無による順応度変化の違いは見られず，また光量に対する順応度の差も見られなかった。他の発光色に対しても，R 光と同様に虹彩の有無による順応度の経時変化は見られず（図 3 - 24，図 3 - 26），光量の違いによる順応度の差も見られなかった（図 3 - 25，図 3 - 27）。

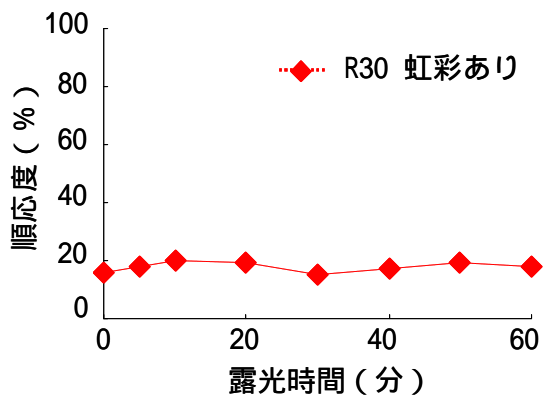


図 3 - 22 虹彩有個体の
R30 点滅光に対する網膜順応度

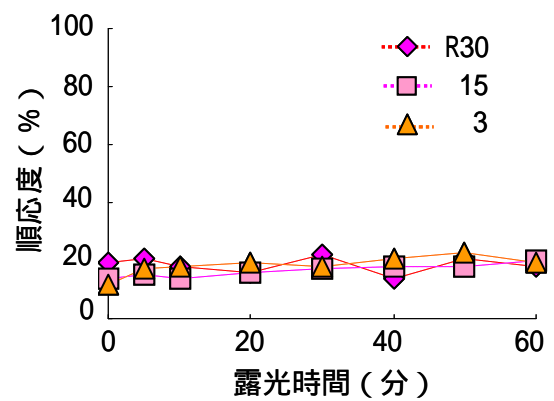


図 3 - 23 虹彩除去個体の光量別
R 点滅光に対する網膜順応度

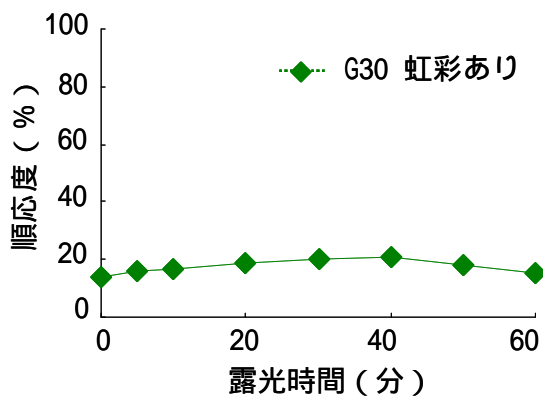


図 3 - 24 虹彩有個体の
G30 点滅光に対する網膜順応度

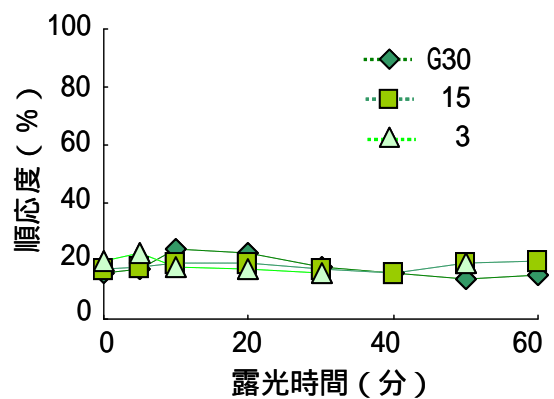


図 3 - 25 虹彩除去個体の光量別
G 点滅光に対する網膜順応度

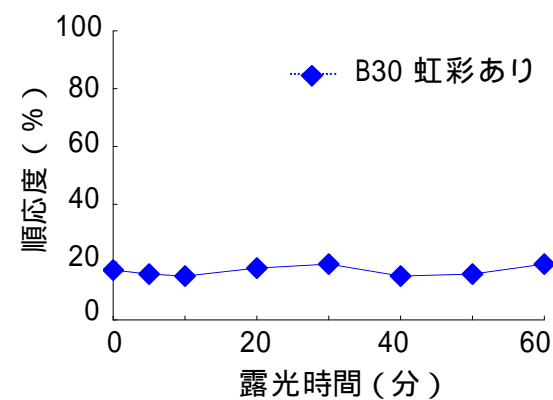


図 3 - 26 虹彩有個体の
B30 点滅光に対する網膜順応度

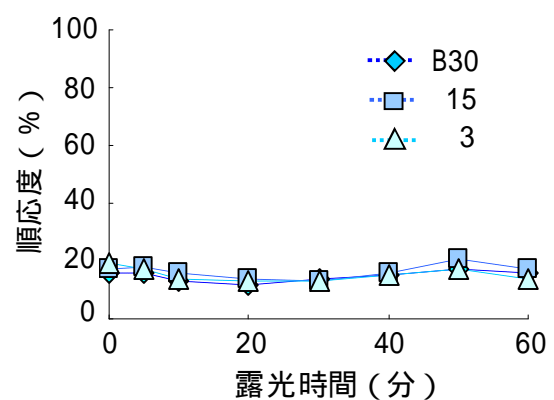


図 3 - 27 虹彩除去個体の光量別
B 点滅光に対する網膜順応度

3 - 2 サンマの網膜運動反応(水槽実験)

サンマの水槽実験は 2008 年 10 月 28 日～11 月 6 日，北海道北見枝幸町の（株）オホーツク活魚の臨海活魚水槽を暗室に仕立てて行なった。

3 - 2 - 1 方法

供試サンマを，遮光した実験水槽内に 18 時以降，2 時間以上暗環境に馴致した。21 時以降に実験を開始し，条件別に光を照射し，3 分または 10 分毎に最大 120 分間，水槽からサンマを 1 尾ずつ取り出した。速やかに尾叉長・体重を測定し，直ちに断頭し頭部をブアン液で固定した。採集したサンプルは，図 3 - 10 に示した常法により 4 μ m 網膜縦断切片を作成し，光学顕微鏡で検鏡した。

i) 実験装置

実験には，内部を黒色に塗装した FRP 水槽（内径 136cm，水深 80cm）を使用した。外部の光を遮光するため水槽を遮光幕で覆い，遮光幕の中央天井部に光源を設置した（図 3 - 28）。

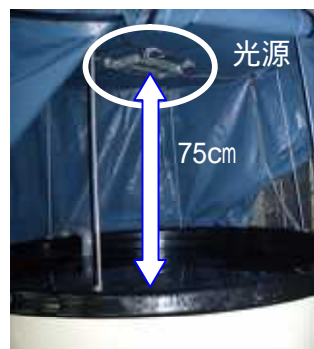


図 3 - 28 遮光した実験用円形水槽

ii) 実験光源・条件

実験には，LED（シャープ，GM5WA06270A）素子を 1 個配列した灯具を使用した。発光色には赤（R，主波長 619nm），緑（G，519nm），青（B，462nm）を使用した。光量は電流制御で調節した。図 3 - 29 に使用光源の分光放射照度，表 3 - 5 に放射照度積分値（積分範囲：380～780nm）を示した。表 3 - 5 より，LED の各発光波長の間で積分値に大きな差がないよう設定した。

実験条件および回数は表 3 - 6 に示した。

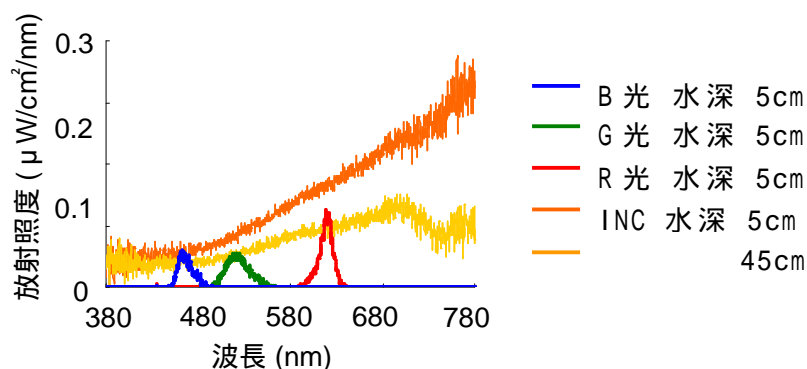


図 3 - 29 LED の各発光色と INC の発光波長分布

表 3 - 5 LED の各発光色と INC の放射照度積分値 (水深 5cm)

積分値	
R	2.1
G	1.6
B	1.2
INC	28.3

表 3 - 6 サンマ 水槽実験 サンプルング条件

発光色	サンプルング間隔	回数
R	30", 3', 6' - 30'	1
G	30", 3', 6' - 30'	1
G	30", 3', 6' - 30'	1
白熱灯	5', 10', 20' - 120'	1
Dark	2h, 4h, 5h, 6h	1

iii) 供試サンマ

実験に使用したサンマは，LED 漁灯を装備した試験船 第 58 栄伸丸より，サンプルング用の細目タモ網を用いて採集した。採集したサンマは移送用水槽に入れ，帰港後直ちに図 3 - 28 の実験水槽へ移送した。移送後はすぐに実験用水槽を遮光し，サンマを 2 時間暗環境に馴致した。

iv) 解析方法

サンマの網膜は，光を受けると錐体細胞が色素上皮層側から外限界膜の方へ移動する。色素上皮～外限界膜間の，錐体細胞の中央部分の移動距離より

(図 3 - 30 , 図 3 - 31) , スルメイカと同様の式 () で光に対する順応度を求めた。図 3 - 30 は暗環境に 4 時間馴致したサンマの順応状態 , 図 3 - 31 は白熱灯を 100 分照射したサンマの順応状態であった。

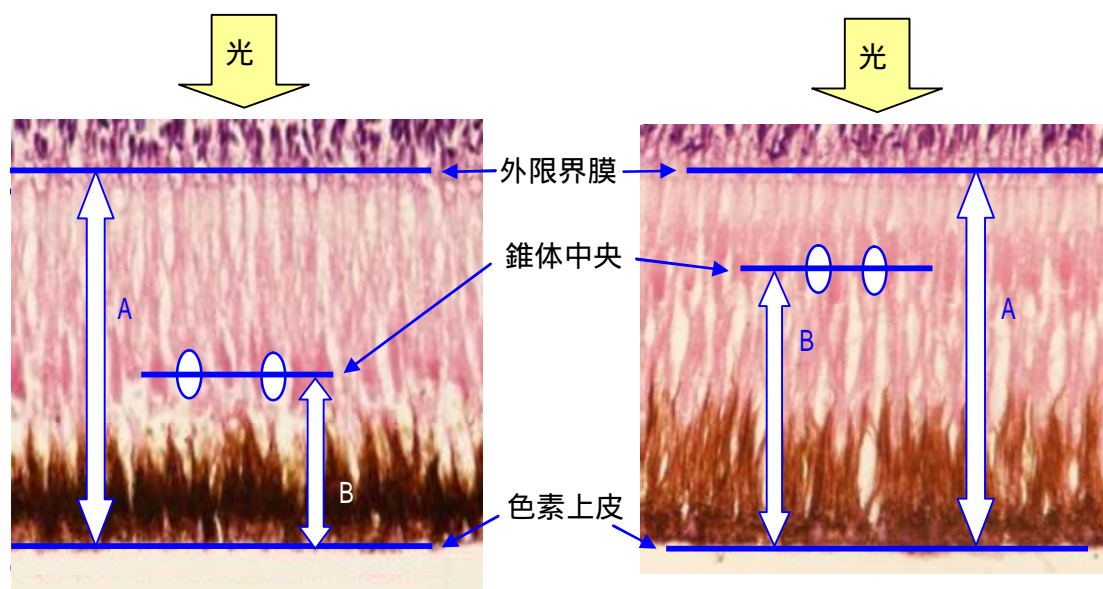


図 3 - 30 暗順応状態のサンマ網膜
(暗環境下に4時間馴致)

図 3 - 31 明順応へ移行中のサンマ網膜
(INC 100 分間照射)

3 - 2 - 2 結果

水槽実験において , 暗環境条件でサンプリングした暗順応状態のサンマ 12 個体の順応度は , 平均 43 % であった。

白熱灯に対する順応度の経時変化を図 3 - 32 , LED の R・G・B 光に対する順応度の変化を図 3 - 33 ~ 図 3 - 35 に示した。図 3 - 32 の白熱灯のグラフより , 光源点灯後 40 分で順応度は 45 % から 79 % までに上昇し , その後 1 時間の順応度変化はほぼ横ばい状態で推移していた。また , LED に対する順応度を発光波長別に見ると , $G > B > R$ の順で経時変化の傾きが大きくなっていった。図 3 - 32 ~ 図 3 - 35 より , 今回の実験条件下ではいずれの光源・発光色においても露光時間に伴い順応度が上昇する傾向が見られた。

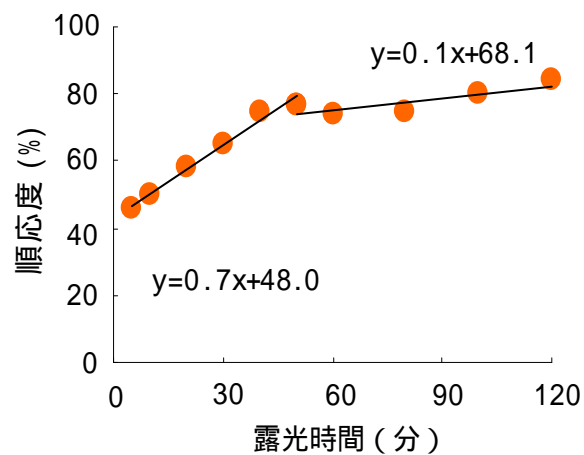


図 3 - 32 白熱灯光に対するサンマの網膜順応度 経時変化

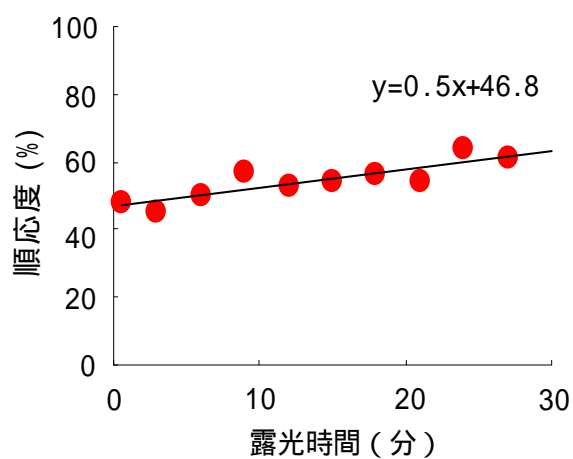


図 3 - 33 LED R 光に対するサンマの網膜順応度 経時変化

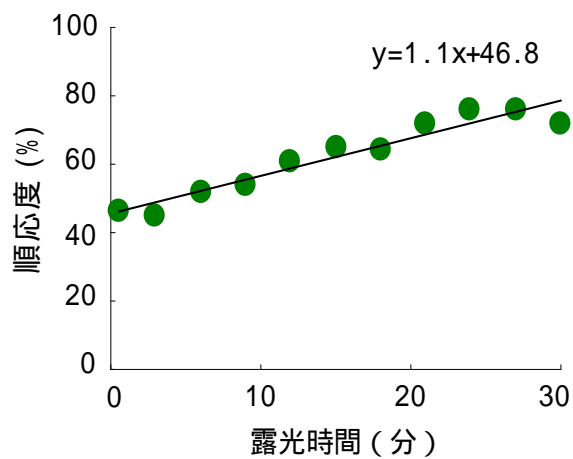


図 3 - 34 LED G 光に対するサンマの網膜順応度 経時変化

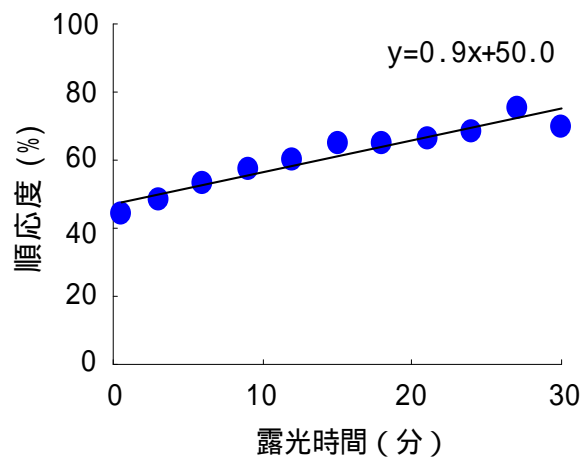


図 3 - 35 LED B 光に対するサマの網膜順応度 経時変化

3 - 3 実操業で釣獲したスルメイカの網膜運動反応

操業船下のスルメイカの順応状態を調べるために，2008 年 6 月と 9 月にイカ釣り漁船に乗船し，釣獲直後のスルメイカをサンプリングした。サンプリングしたスルメイカは直ちにブアン液で固定した後，3 - 1 - 1 v) vi)と同様の方法で順応度を求めた。

3 - 3 - 1 サンプリング方法

i) LED 船上灯装備漁船におけるサンプリング

2008 年 6 月 5～9 日，中型イカ釣り漁船 第 12 白嶺丸 (138GT) (図 2 - 2) に乗船し，サンプリングを行なった (39° 31' N, 135° 59' E 図 3 - 36)。第 12 白嶺丸は LED 船上灯を 75kW 装備しており，サンプリング当時は全体の 2 割以下の光量 (15kW) 行なっていた。サンプル個体の釣獲時の漁場状況および光量設定の変化を表 3 - 7～表 3 - 9 に示した。



図 3 - 36 第 12 白嶺丸 サンプリング場所 (08 6/5～9 39° 31' N, 135° 59' E)

表 3 - 7 スルメイカのサンプリング状況

08 年 6 月 5 ~ 6 日 39 ° 29 N 135 ° 55 E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
1 ~ 10	15:10 ~ 18:26	天空光	漂流操業
	19:10	日没	
	19:18	LED on (80%)	
11 ~ 25	18:59 ~ 23:34	徐々に減光 (80 10%)	集魚操業
26 ~ 35	0:43 ~ 3:35	LED (20%)	集魚操業
36 ~ 39	3:56 ~ 4:26	徐々に増光 (20 80%)	集魚操業

表 3 - 8 スルメイカのサンプリング状況

08 年 6 月 7 ~ 8 日 39 ° 35 N 136 ° 10 E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
1 ~ 10	15:10 ~ 18:26	天空光	漂流操業
	19:10	日没	
	19:18	LED on (80%)	
11 ~ 25	18:59 ~ 23:34	徐々に減光 (80 10%)	集魚操業
26 ~ 35	0:43 ~ 3:35	LED (20%)	集魚操業
36 ~ 39	3:56 ~ 4:26	徐々に増光 (20 80%)	集魚操業

表 3 - 9 スルメイカのサンプリング状況

08 年 6 月 8 ~ 9 日 39 ° 36 N 136 ° 02 E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
80 ~ 84	15:25 ~ 19:08	天空光	漂流操業
	19:10	日没	
85	19:17	天空光	漂流操業
	19:41	LED on (80%)	
86 ~ 90	20:13 ~ 20:55	徐々に減光 (80 30%)	集魚操業 (手釣り)
91	21:12	LED (20%)	集魚操業 (手釣り)
92 ~ 94	21:45 ~ 22:29	LED (20%)	集魚操業
95	23:00	LED (10%)	集魚操業 (手釣り)
96 ~ 113	23:07 ~ 3:48	LED (10%)	集魚操業

ii) LED 水中灯を使用した調査船からのサンプリング

2008 年 9 月 18 ~ 23 日, 石川県水産総合センターの漁業調査指導船 白山丸 (167GT) (図 3 - 37) に乗船し, サンプリングを行なった (図 3 - 38)。白

山丸はサンプリング当時，船上灯 3kW メタルハライド灯×78 個，5kW ハロゲン灯×10 と，600WLED 水中灯を装備していた。自動イカ釣機の釣具最下水深は全て 75m であった。サンプル個体を釣獲した時の漁場状況を表 3 - 10 ~ 表 3 - 13 に示した。



図 3 - 37 漁業指導調査船 白山丸 (奥)



図 3 - 38 白山丸 サンプリング場所 (08 9/18 ~ 23)

表 3 - 10 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸)

08 年 9 月 19 ~ 20 日 39 ° 22 N 135 ° 20 E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
1 ~ 30	20:07 ~ 2:31	MH船上灯 (3kW × 72)	集魚操業

表 3 - 11 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸)

08 年 9 月 20 日 39° 19' N 135° 24' E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
31 ~ 42	12:26 ~ 17:54	天空光	漂流操業
	17:59	日没	
		水中灯 船首: 点滅光 100%	
43 ~ 50	18:10 ~ 18:34	船尾: 連続光 100%	集魚操業
		船上灯 船首: HG5kW × 2	
		船尾: HG5kW × 3	

表 3 - 12 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸)

08 年 9 月 21 日 39° 15' N 135° 25' E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
51 ~ 56	3:39 ~ 5:27	HG船上灯 5kW × 2	集魚操業
	5:46	日昇	
57 ~ 70	6:33 ~ 12:37	天空光	漂流操業

表 3 - 13 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸)

08 年 9 月 23 ~ 24 日 39° 15' N 135° 31' E

標本番号	釣獲時刻	漁灯の状態	備考
71 ~ 72	21:52 ~ 21:54	MH船上灯 (3kW × 8)	集魚操業
		水中灯点滅光	
73 ~ 78	22:20 ~ 0:16	水中灯点滅光	集魚操業
79 ~ 84	4:08 ~ 4:54	MH船上灯 (3kW × 8)	集魚操業
85 ~ 86	5:10 ~ 5:20	MH船上灯 (3kW × 8)	集魚操業
		水中灯連続光	
87 ~ 90	20:31 ~ 20:51	MH船上灯 (3kW × 8)	集魚操業
91 ~ 92	22:13 ~ 22:18	MH船上灯 (3kW × 8)	集魚操業
		水中灯連続光	
93 ~ 94	23:10 ~ 23:12	MH船上灯 (3kW × 8)	集魚操業
95 ~ 98	23:48 ~ 23:55	HG船上灯 5kW × 5	集魚操業
		水中灯点滅光	

3 - 3 - 2 結果

i) 釣獲直後のスルメイカ網膜順応度(6月,第12白嶺丸,LED船上灯)

図3-39に第12白嶺丸にてサンプリングした,スルメイカの釣獲直後の網膜順応度を,釣獲時間・操業方法別に示した。

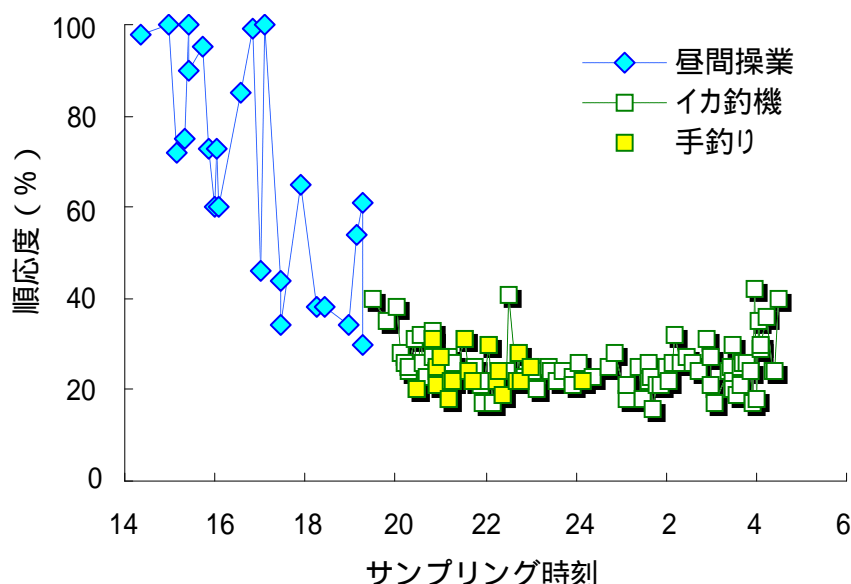


図3-39 LED船上灯および太陽光下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度
08年6月5~9, SS/19:10 SR/4:35, LEDon/19:30 LEDoff/4:10

昼間の操業開始から17時までに釣獲した個体の順応度は50~100%であった。日没時刻の約2時間前から順応度が下がり始め,LED漁灯を点灯した状態で釣獲した個体の順応度は16~42%となっていた。LED点灯操業中は,光量の増減を随時行なっていたが(表3-7~表3-9),これに伴う順応度の変化は見られなかった。サンプリングは,自動イカ釣機で釣獲したスルメイカの他,手釣りでも行なった(表3-9)。そこで,図3-40に釣獲水深と網膜順応度の関係を釣獲方法別に示した。自動イカ釣機の釣獲水深は,釣具先端の沈子の最下水深から擬餌針までの距離5mを引いた値とした。図より,夜間操業中に釣獲したスルメイカの網膜順応度は,自動イカ釣機・手釣りの場合とも順応度は20~40%の範囲であり,また,夜間操業中に,手釣りでも釣獲した個体と自動イカ釣機で釣獲した個体とでは,分散が等しくないと仮定した2標本のt検定を行なったところ順応度に有意差(有意水準5%)は見られなかった($t(98)=0.054, n.s.$)。図3-41に,夜間の操業中にサンプリングし

た計 104 個体のうち，日没約 2 時間後の 21 時から 24 時までを「前半夜」(33 個体)，0 時から日出 1 時間半前の 3 時までを「後半夜」(28 個体)とし，前半夜と後半夜の網膜順応度を比較した。分散が等しくないと仮定した t 検定より，前半夜と後半夜の網膜順応度には有意差(有意水準 5%)は見られなかった($t(61)=0.431, n.s.$)。

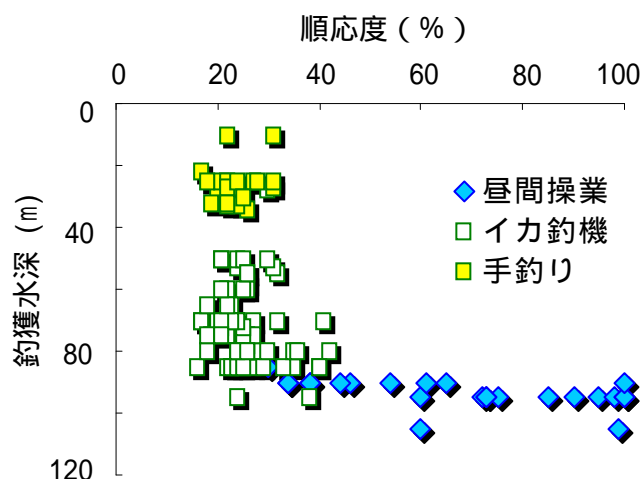


図 3 - 40 LED 船上灯および太陽光下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度
釣獲方法別 順応度と釣獲水深の関係

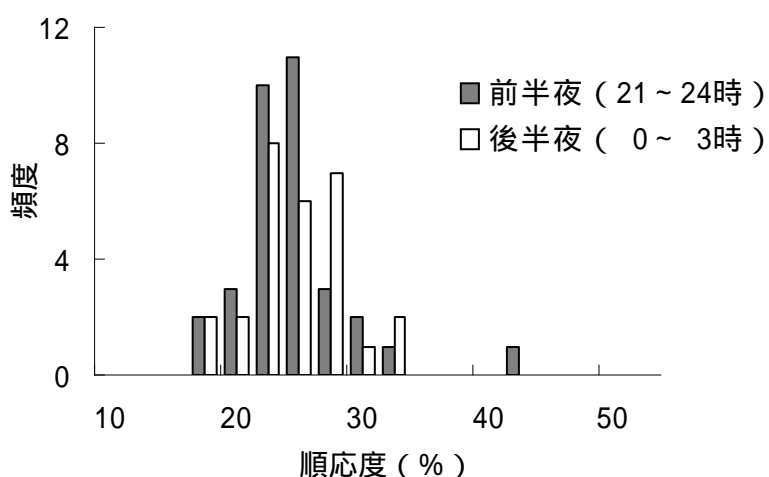


図 3 - 41 LED 船上灯下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度
前半夜と後半夜の比較

ii) 釣獲直後のスルメイカ網膜順応度 (9 月, 白山丸, LED 水中灯・MH 船上灯)

図 3 - 42 に，白山丸でサンプリングしたスルメイカの釣獲直後の網膜順応

度を，釣獲時間・使用光源別に示した。図より，メタルハライド船上灯使用中に釣獲した個体の順応度は 23～65%，LED 水中灯使用時に釣獲した個体の順応度は 24～60%であった。昼間の操業中に釣獲したイカは，日出時刻付近から明順応へ移行し始め，15 時頃まで 90～100%の順応度であった。

夜間の操業中に釣獲したスルメイカに，釣獲水深によって順応度に変化があるかを調べるため，図 3 - 43 に釣獲水深と順応度の関係を示した。また，メタルハライド船上灯・LED 水中灯使用時で順応度に差があるかについても調べた。なお，サンプリングしたイカがかかっていた針が最も深くまで下りた水深を釣獲水深と仮定した。図より，LED 船上灯，メタルハライド船上灯，LED 水中灯いずれの場合においても水深の違いに関わらず順応度は 23～65%であった。また，前頁と同様の t 検定を行なったところ，LED 水中灯・メタルハライド船上灯を使用し釣獲したスルメイカの順応度に有意差(有意水準 5%)は見られなかった($t(55)=0.082, n.s.$)。

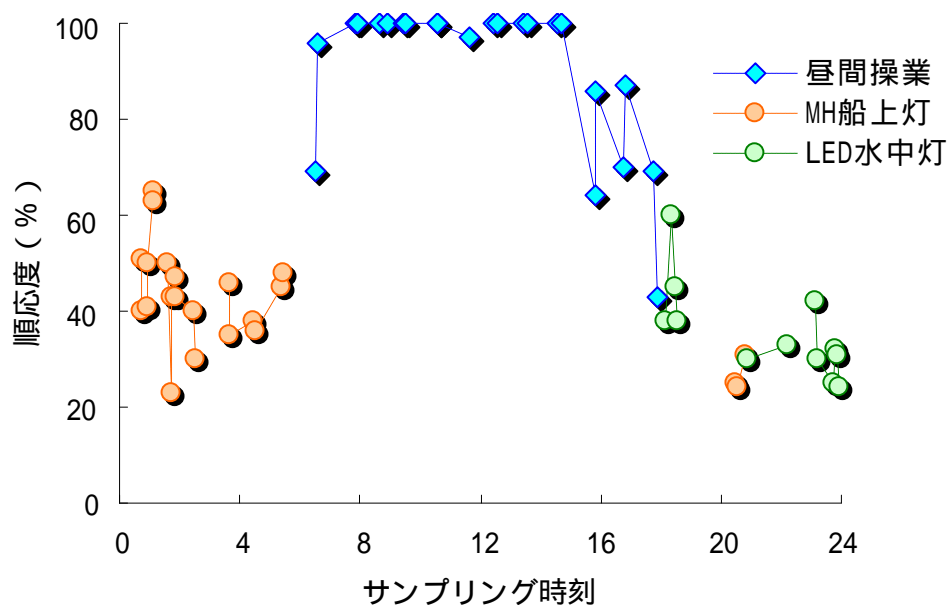


図 3 - 42 LED 水中灯・MH 船上灯および太陽光下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度 24 時間の経時変化 (SS/18:00 SR/5:50)

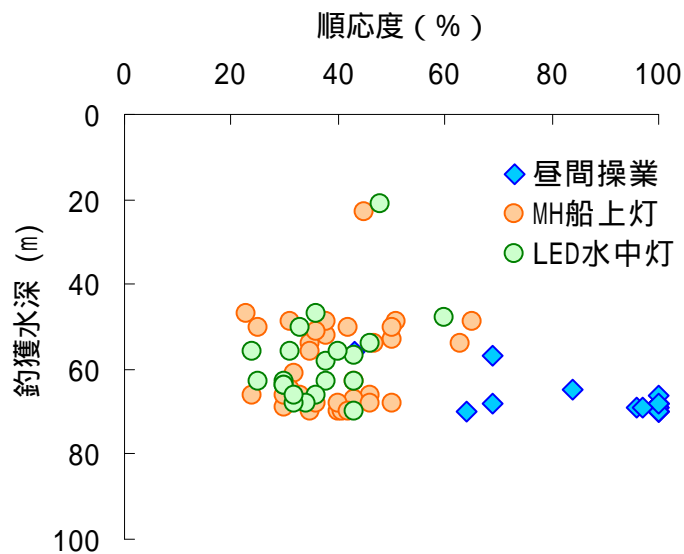


図 3 - 43 LED 水中灯・MH 船上灯および太陽光下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度 釣獲水深と順応度との関係

3 - 4 実操業で漁獲したサンマの網膜運動反応

実操業における漁船下のサンマの網膜順応状態を調べるため、2008 年 12 月にサンマ棒受網漁船に乗船し、サンプリングを行なった。サンプリングしたサンマは直ちにブアン液で固定した後、3 - 1 - 1 v) vi)と同様の方法で順応度を求めた。

3 - 3 - 1 サンプリング方法

2008 年 12 月 1 日、サンマ棒受網漁船 第 1 太喜丸 (133GT) (図 2 - 20) に乗船し、当日 1 回目の操業時にサンプリングを行なった (39° 24' N, 142° 52' E 図 3 - 44)。操業開始時から約 10 分後の 18:20 に、フィッシュポンプで吸い上げられたサンマ 10 尾を直ちにブアン液で固定した。



図 3 - 44 第 1 太喜丸サンプリング場所 (08 12/1 39° 24' N, 142° 52' E)

3 - 3 - 2 結果

表 3 - 14 に , 実操業中にサンプリングしたサンマの左右眼の順応度を表した。図 3 - 45 に , この順応度の頻度分布を示した。

図表より , 漁獲直後のサンマの順応度は 44 ~ 60 % であった。また , 順応度 50 ~ 55 % のサンマが最も多く確認でき , 水槽実験でサンプリングした暗順応状態のサンマの順応度 43 % よりやや高い値であった。

表 3 - 14 棒受網操業時にサンプリングしたサンマの網膜順応度

標本番号	順応度 (%)	
	左眼	右眼
1	60	48
2	47	49
3	50	48
4	51	51
5	46	50
6	49	44
7	47	50
8	46	46
9	50	48
10	56	53

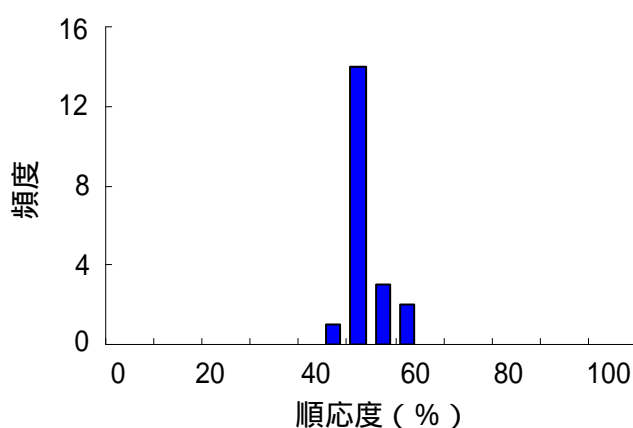


図 3 - 45 棒受網操業中にサンプリングしたサンマの網膜順応度 頻度分布

3 - 4 考察

3 - 4 - 1 スルメイカの網膜運動反応

LED 光源を用いた水槽実験では , R・G・B・W 光に対するスルメイカの網膜運動反応は , 連続光・点滅光 , 発光波長・光量いずれの各条件に対して

も順応度の変化は見られなかった(図 3 - 14 ~ 図 3 - 27)。また Inada¹⁶⁾ は水槽中の露光実験でスルメイカの網膜内で黒色色素の移動が見られなかったのは虹彩の遮光機能によるものと指摘しており, 本実験の開始前に右眼の角膜および虹彩を取り除いたが, 黒色色素の移動は確認できず, また虹彩の有無による順応度にも差は見られなかった。

実作業中に釣獲直後サンプリングしたイカは, 夜間は暗順応もしくはそれに近い状態であり, 日出時刻の 1 時間後には明順応状態へ移行し始め, 日中はほぼ 100% の順応度に達していた。その後, 日没の 2 ~ 3 時間前から暗順応状態へ移行し始めていた(図 3 - 39, 図 3 - 42)。また, 夜間の LED 船上灯使用時に釣獲された個体の順応度は 16 ~ 42%, MH 船上灯使用時の個体の順応度は 23 ~ 65%, LED 水中灯使用時の個体の順応度は 24 ~ 60% であった(図 3 - 40, 図 3 - 43)。

水槽実験時に順応度が変化しなかった理由として以下のように考察した。実験水槽では LED 光源の直下で測光を行ない, 30 灯点灯した際の光源直下の放射照度積分値は約 $15 \sim 17 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ とわかったが(図 3 - 7), LED は指向性が高いため, 光源直下以外の位置では光量が低くなっていることが予想される。これにより水槽内にスルメイカの好適照度域ができ, 光に高感度な暗順応状態を保っていたものと考えた。

実作業中に釣獲した個体の順応度は, 日中の 8 ~ 15 時(2008.9) ではほぼ 100% の明順応状態であった(図 3 - 42)。また日本海を回遊するスルメイカは, 日中には水深 40 ~ 80m の層を遊泳していることが報告されている³¹⁾ 14 時の水深 80m の放射照度積分値を求めたところ, $6.96 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であり(図 2 - 16, 2007 年 3 月), 第 12 白嶺丸の主な漁場である 6 月の大和堆においてはさらに低照度であると予想される。夜間, LED 船上灯使用時に釣獲したスルメイカは, 釣獲水深によらずほぼ暗順応状態であった(図 3 - 40)。メタルハライド船上灯・LED 水中灯使用時に釣獲したスルメイカは, やや順応度の高い個体もいたものの, 完全に明順応している個体は確認されなかった。以上のことから, 日照時は海中内に陰影部がなくスルメイカは明順応状態へ移行するが, 夜間は暗い海水中に光環境ができ, 陰影部が存在する状態のため, 遮光域に滞留するスルメイカは暗順応状態を保っていたものと予想した。

しかし、魚類では網膜運動反応に日周性があることが指摘されており、¹⁸⁾スルメイカの順応度変化が照度変化または日周性によるものかを精査するため、今後、日出・日没の時間帯の測光、水槽内において一定の光量の下で24時間連続的にスルメイカをサンプリングする必要がある。

3 - 4 - 2 サンマの網膜運動反応

LED、白熱灯を用いた水槽実験では、R・G・B光、白熱光の全ての条件において光源点灯から3～6分後に錐体細胞が外限界膜側へ移動し始め、露光時間の経過に応じて明順応状態へと移行することがわかった(図3-32～図3-35)。また、同光量のRGB光の間では、G光が最も順応度の上昇が早いことがわかった(図3-34)。これはG光の主波長がサンマの暗順応状態の網膜の分光感度が高い510nm³²⁾に近かったためと考えられる。白熱光下で行なった実験では、光源点灯から40分後まで順応度が上昇していたが、50～120分後では顕著な上昇はなく、同程度の順応状態で推移することがわかった(図3-32)。よって、サンマは光を照射してから3～40分までに感度調整を行なっているものと考えられる。また、光源点灯直後から40分までの順応度上昇の傾きは、G、B光を照射した場合の傾きよりも低かった。これについて、水深5cmの位置で測った水槽内の放射照度積分値は、白熱灯ではLED光の15倍近い値であった(表3-5)。しかしながら、白熱灯の発光波長には水中で消散しやすい長波長側の成分が多く含まれているため、サンマが遊泳していた水深は低照度域であったと考えられる。

操業中にサンプリングしたサンマの順応度は44～60%であった(図3-45)。水槽実験において、2～5時間暗環境に馴致した12個体の順応度と比較すると有意な差はみられなかった($t(22)=0.068, n.s.$)。サンプリングしたサンマの詳細な行動履歴(生棲水深、船下に滞留した時間など)は知ることができないが、今回の操業状況ではサンマは暗順応状態で灯光に集約され、追従するものと考えられた。今後、同じ操業場所で、連続操業をする場合の2回目以降の操業時のサンプリングも必要であると思われる。

第 4 章 総合考察

灯光利用漁業では、現在課題となっている光量増大競争を改善するために、漁灯の使用方法の見直し・検討が必要となっている。本研究では既存光源の不足点を補える光源として期待される LED 光源について、導入・応用に向けた指標を得るための調査・実験をおこなった。

第 2 章では、イカ釣り、サンマ漁船周辺の測光を行い、イカ釣り漁船ではさらに釣具ライン操作域の光環境を明らかにした。

第 3 章では、スルメイカ・サンマの網膜運動反応を調べ、操業船下における対象種の光感覚を理解することを試みた。

以上の結果の関連を吟味し、適切な漁灯操法を考える上で必要な(1)光源の特性、(2)漁場海水の光学的性質、(3)漁獲対象種の光感覚¹²⁾の相互関係を、実操業の成果を含めて考察した。

第 3 章の測光で、測光実施海域で最も透過し易い発光波長は 450～550nm であること、また長波長側の光は海水中で減衰しやすいことを確認した(図 2-9, 図 2-22)。白熱灯は発光波長の成分の多くが可視光の長波長側から赤外線のため、海面下での消散が著しい(図 2-26)。メタルハライド灯は可視光の範囲にいくつかの発光波長のピークがあり、短波長側の光は海水中に透過する一方で、長波長側の光は水深 10m 付近ではほとんど減衰していた(図 2-11, 図 2-27)。LED は海水に透過し易い波長を選択でき、調光可能のため、イカ釣り漁船の測光においては低出力でメタルハライド灯と同等以上の配光を得ることも可能であった(図 2-14, 図 2-15)。

本研究では、漁場におけるスルメイカが、昼間は明順応状態、夜間は光に高感度な暗順応状態であることを明らかにした(図 3-39, 図 3-42)。また、これまでの対光行動実験より、スルメイカは照射域近くの遮光域に集まることがわかっている。²²⁾ スルメイカが遮光域に集まることを利用し、釣獲層を浅化するために、LED の調光が容易である点を活かし、配光を漁場環境に合わせて変えることができる。また、対象種の視感度と漁場海水の透過特性をさらに詳細に知ることによって LED の発光波長決定にも繋がるものとする。

サンマの網膜運動反応は、網膜の視物質の分光吸光視感度のピークが

510nm にあり、³²⁾ 水槽実験では緑色光を照射したときが最も明順応に移行しやすかった。また、操業船下のサンマは暗順応状態で灯光に追従しているものと推察された。

上記の3要素を考慮しつつ設計されたLEDは、実操業で機能しつつある。LED漁灯を装備したイカ釣り漁船 第12白嶺丸では、一操業あたりの燃油消費量がメタルハライド灯装備漁船と比較して1/2～1/5まで削減できている。サンマ棒受網漁船太喜丸についても、LED漁灯に換装し始めた2005年以降、漁期を通して2004年以前の水揚水準は維持しつつ、操業中の燃油消費量も2/5～1/15に削減でき、400～500万円/漁期の白熱球の交換費も不要となった。同規模他船と比較しても操業時間および水揚量に大差無く、健闘している。この結果からも、LED灯が漁灯漁業における灯光としてサンマ棒受網操業には有効に機能していることが実証された。

以上のことから、LEDの特長を活かした操法を構築することで、効果的なイカやサンマの対光行動制御・漁獲が可能であると考えられる。研究者によるさらなる適正な光源の使用方法の解明およびその結果に基づく啓発、沖の要求仕様に応えるメーカーによる展開・漁業者の「大光量＝漁獲に繋がる」という概念を柔軟に再検討することで、持続的な灯光利用漁業として発展していくものと期待される。

謝辞

本研究に携わり、仕上げるにあたってご指導して下さった多くの方々に心から御礼を申し上げます。

まず、本研究を通じて、研究の進行・結果の解析方法・発表に至るまでご指導していただきました東京海洋大学 生物資源学科 魚群制御学研究室の稲田博史先生に心から御礼申し上げます。稲田先生を通じて経験した漁業の現場との出会い・「楽しむ」研究との出会いは、すべてが自身の成長の糧となり、中身の詰まった充実した3年間となりました。ありがとうございました。

同研究室の有元貴文先生、秋山清二先生には、測光・網膜運動反応実験のご助言や、研究室の日々の生活の指導もしていただきました。大変感謝しております。

株式会社 東和電機製作所の佐野栄作様をはじめとする社員の皆様、白嶺水産株式会社の宮崎邦男様、鈴木正利様をはじめとする皆様、マル井水産 有限会社の井上幸宣様、井上太喜先輩をはじめ乗組員の皆様には、本研究の肝となった測光に同行させていただきました。光を測ることの奥深さや、解析の楽しさを知るきっかけを与えてくださったことに加え、測光現場で感じた漁業技術向上への皆様一人一人の熱い思いは本研究の道標となりました。ありがとうございました。

清運丸の木村船頭には漁船に乗せてもらい、数日間実際の操業に参加させていただきました。人生初の本格的な漁船で、右も左もわからないような状態でしたが、イカ釣り漁業について指南してくださり、スルメイカへの理解がより深まりました。ありがとうございました。

豊進丸の佐藤豊次船頭には、供試スルメイカの提供や、実験への助言をいただきました。操業や微力ながら朝の水揚げに参加させていただき、イカ釣り漁業への思いを感じ、また文献ではわからない現場の問題を感じたことは、本研究に活きる貴重な経験となりました。ありがとうございました。

藤本信治様はじめ株式会社 オホーツク活魚の皆様、森坂芳雄船頭をはじめ森坂漁業部の皆様には、サンマの実験の場所・供試魚を提供していただきました。実験に対する親身なアドバイスは、研究のさらなるステップアップ

へと繋がりました。大変感謝しております。

李 炫基先輩，佐藤 舞先輩には，研究生活の一から十まで指導していただき，研究進行を支えていただきました。この研究室の日々を振り返ると，お二人の存在が非常に大きく，常に手本であり目標でもありました。ありがとうございました。

金子裕君，松井俊介君，田中龍紀君，佐藤克哉君，味埜敏郎君，村本卓也君には，実験や現場の生活を共にする中でいつも助けていただきました。皆さんのおかげで辛い昼夜逆転生活も楽しく過ごすことができました。

この研究を通じて，多くの人々との出会いがありました。漁業にける想いは皆熱く真剣で，そんな想いを持った人々の支えがあったからこそ研究を進めることができたと実感しています。3年間で得た貴重な経験を今後に活かし，常に向上心をもって新たな目標へ挑んでいきたいと思います。

参考文献

- 1) 水産統計部 .「平成 19 年漁業・養殖業生産統計年報」農林水産統計協会 , 東京 . 2007
- 2) 金田禎之 .「日本の漁業と漁法」成山堂書店 , 東京 . 1995
- 3) 稲田博史 , 有元貴文 . 漁業用灯光の現状と開発動向 . 照明学会誌 2007 ; 91(4) : 199-209
- 4) 稲田博史 , 小倉通男 . イカ釣り漁業における集魚灯の変化 . 東京水産大学論集 1989 ; 24 : 135-153
- 5) 鈴木恒由 . スルメイカの光に対する生理反応と集魚灯の省エネ対策について . 日本水産保護協会・月報 1986 ; 266 : 11-25
- 6) 石川敏夫 . 最近の集魚灯について . 漁船 . 1997 ; 327 : 44-52
- 7) 小原章男 . 光源 .「照明工学(新版)」(社会法人照明学会編)オーム社 , 東京 . 1997 ; 16-60
- 8) 福島信一 . 北西太平洋系サンマの回遊機構の綜観的解析 . 東北水研研究報告 1979 ; 41 : 1-70
- 9) 有元貴文 . 集魚灯技術 .「スルメイカの世界 - 資源・漁業・利用 - 」(有元 , 稲田編)成山堂書店 , 東京 . 2003 ; 203-221
- 10) 稲田博史 . イカ釣り漁業における漁獲技術に関する研究 . 日水誌 2005 ; 71(5) : 717-720
- 11) 全国漁業協同組合連合会 . 小型いかつり光力適正化検討事業実態調査・実証調査報告書 . 1996 : 1-8
- 12) 崔淅珍 , 荒川久幸 , 中村善彦 , 有元貴文 . 日本海のイカ釣り漁場における海水の光学的水型と集魚灯光の透過特性 . 日水誌 1998 ; 64(4) : 650-657
- 13) 小倉通男 , 柳川三郎 , 名角辰郎 . イカ釣り漁業の研究 イカ釣り漁船における集魚灯の水中放射照度分布について . 昭和 48 年度日本水産学会秋季大会講演要旨論集 1973 ; 5
- 14) 名角辰郎 . イカ釣り漁業と火光討論 . 日水誌 1972 ; 38(8) : 886-889
- 15) 荒川久幸 , 崔淅珍 , 有元貴文 , 中村善彦 . 小型イカ釣り漁船の集魚灯の海中放射照度分布 . 日水誌 1996 ; 62(3) : 420-427

- 16) Inada , H . Retinomotor Response and Retinal Adaptation of Japanese Commom Squid *Todarodes pacificus* at Capture with Jigs . Fish . Sci . 1996 ; 62(5) : 663-669
- 17) 川村軍蔵 .ゴマサバ視覚とその釣漁法への応用に関する基礎的研究 網膜運動反応 . 日水誌 1979 ; 45(5) : 553-555
- 18) 長谷川英一 , 小林裕 , 丹波宏 . 集魚灯に集まる魚類の網膜運動反応の前・後半夜での比較 . 日水誌 1991 ; 57(3) : 425-431
- 19) 張秀海 , 有元貴文 , 井上実 . ストロボ光によるマアジの網膜運動反応 . 東京水産大学研究報告 1989 ; 76 : 65-72
- 20) 長谷川英一 , 小林裕 , 丹羽宏 . 水中灯に蝟集した魚類の網膜運動反応 . 日水誌 1990 ; 56(2) : 367
- 21) 岡見登 , 岸野元彰 . 海中光の測定 . 「海洋測定法」(黒木編)東京大学出版会 , 東京 . 1972 ; 107-136
- 22) 李炫基 . スルメイカの光感覚と対光行動のイカ釣漁業への応用に関する研究 . 東京海洋大学修士学位論文 . 2008 ; 22-68
- 23) 杉森康宏 . 海中の放射伝達 . 「海洋環境光学」(杉森・坂本編)東海大学出版会 , 東京 . 1985 ; 81-128
- 24) 梶原昌弘 . 海洋の懸濁物質 . 「海洋環境光学」(杉森・坂本編)東海大学出版会 , 東京 . 1985 ; 234-256
- 25) 柳川三郎 , 柏俊行 , 井上清 . 大和堆漁場の形成機構に関する研究 . うみ 1978 ; 16(1) : 23-35
- 26) Okami,N . Kishino,M and Sugihara,S . Measurements of spectral irradiance in the seas around the Japanese islands . Technical report of the physical oceanography laboratory ,The institute of physical and chemical research , 1978 ; 2 : 130
- 27) 原富之 . 頭足類網膜の感光色素 . 「現代動物学の課題 3 光感覚」(日本動物学会編)学会出版センター , 東京 . 1975 ; 53-86
- 28) 会田勝美 . 「魚類生理学の基礎」恒星社厚生閣 , 東京 2002 ; 77
- 29) 田村保 . 魚類網膜の明暗順応の状態と照度の関係 . 日水誌 1957 ; 22(12) : 742-746

- 30) Suzuki, T . Inada, H and Takahashi, H . Retinal Adaptation of Japanese Common Squid (*Todarodes pacificus* Steenstrup) to Light Changes .
Bull.Fac.Fish.Hokkaido Univ . 1985 ; 36(4) : 191-199
- 31) 名角辰郎 . 日本海西南海域におけるスルメイカ漁場について . 水産海洋研究会報 . 1969 ; 14 : 108-114
- 32) 長谷川英一 . 総説 魚類の視覚生理と行動制御への応用 . マリンバイオテクノロジー研究会報 . 1994 ; 7

図表リスト

第 1 章

- 図 1 - 1 自動イカ釣り機普及以前のイカ釣り具例 (ソクマタ(左)とトンボ(右))4)
- 図 1 - 2 ハロゲン灯の構造
- 図 1 - 3 メタルハライド(MH)灯の構造
- 図 1 - 4 イカ釣り漁船に装備されている MH 灯
- 図 1 - 5 ハロゲン灯を点灯したイカ釣り漁船
- 図 1 - 6 サンマ旋網模式図 8) A:サイラ網, B:サンマ網, C:流し旋網
- 図 1 - 7 漁灯を点灯したサンマ棒受網漁船

第 2 章

- 図 2 - 1 測光実施場所 (37° 16' N, 137° 17' E)
- 図 2 - 2 測光対象船 第 12 白嶺丸
- 図 2 - 3 第 12 白嶺丸の灯具配置 (船尾から見た船体中央断面図)
- 図 2 - 4 第 12 白嶺丸の灯具配置 (左舷側面図)
- 図 2 - 5 水中分光放射照度計 (Satlantic 社, Hyperpro_Multi plus)
- 図 2 - 6 水中光束消散係数計 (WET Labs 社, C Star)
- 図 2 - 7 船体周辺の測光方法
- 図 2 - 8 釣り具操作範囲の測光方法
- 図 2 - 9 太陽光 水深別分光放射照度および透過率
(07/3/15 14:00 晴 37° 16' N, 137° 17' E)
- 図 2 - 10 測光実施海域の水温および光束透過率
- 図 2 - 11 光源別 水中分光放射照度 (第 12 白嶺丸 左舷中央から 30m)
- 図 2 - 12 LED 漁灯を点灯した第 12 白嶺丸
- 図 2 - 13 MH 漁灯を点灯した第 12 白嶺丸
- 図 2 - 14 LED75kW 点灯時の船周辺の配光 (第 12 白嶺丸左舷正横方向)
- 図 2 - 15 MH174kW 点灯時の船周辺の配光 (第 12 白嶺丸左舷正横方向)
- 図 2 - 16 釣り具操作範囲の放射照度積分値 (積分範囲 380~780nm)
- 図 2 - 17 魚群探知機で見た釣り具最下水深 (2008 年 6 月 8 日 0:08)

図 2 - 18 光源別 釣具操作範囲の放射照度積分値

(積分範囲:380~780nm LED・MH は計算値)

図 2 - 19 測光実施場所(2008 年 8 月 9 日 39°38' N,141°35' E)

図 2 - 20 測光対象船 第 1 太喜丸

図 2 - 21 第 1 太喜丸 船体周辺の測光位置

(07/8/11 14:00 晴 39°46' N,141°39' E)

図 2 - 22 太陽光 水深別分光放射照度および透過率

図 2 - 23 INC,MH,LED 全点灯中の光束透過率および水温(05/8/11,21:12)

図 2 - 24 MH,LED 全点灯中の光束透過率および水温(06/8/12,20:36)

図 2 - 25 LED 全点灯中の光束透過率および水温(08/8/9,23:22)

図 2 - 26 水深別 水中分光放射照度

(INC+MH+LED 計 502.1kW 2005,左舷から 20m)

図 2 - 27 水深別・水中分光放射照度

(MH+LED 計 124.4kW 2006,左舷から 20m)

図 2 - 28 水深別・水中分光放射照度(LED 43.8kW 2008,左舷から 20m)

図 2 - 29 漁灯種類別,第 1 太喜丸周辺の配光(積分範囲:380~780nm)

表 2 - 1 測光実施日および位置

表 2 - 2 第 1 太喜丸 各年の装備漁灯と最大出力

第 3 章

図 3 - 1 スルメイカの網膜構造 模式図

図 3 - 2 魚類の網膜構造 模式図

図 3 - 3 遮光した FRP 実験水槽

図 3 - 4 実験水槽内部の仕様(左:水槽の寸法,右:区画設定方法)

図 3 - 5 LED 光源パネル(左)と光量の調節方法(右)

図 3 - 6 実験用 LED の発光波長

図 3 - 7 発光色別 実験用 LED の放射照度積分値(積分範囲:380~780nm)

図 3 - 8 スルメイカの各部位の名称

図 3 - 9 角膜・網膜の除去方法(左),スルメイカ眼球の構造(右)

図 3 - 10 網膜縦断切片 作成過程

- 図 3 - 11 暗順応状態のスルメイカ網膜縦断面
- 図 3 - 12 明順応へ移行中のスルメイカ網膜縦断面
- 図 3 - 13 明順応状態のスルメイカ網膜縦断面
- 図 3 - 14 虹彩の有無別 R30 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 15 虹彩除去個体の R 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 16 虹彩の有無別 G30 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 17 虹彩除去個体の G 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 18 虹彩の有無別 B30 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 19 虹彩除去個体の B 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 20 虹彩の有無別 W30 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 21 虹彩除去個体の W 光に対する網膜順応度
- 図 3 - 22 虹彩有個体の R30 点滅光に対する網膜順応度
- 図 3 - 23 虹彩除去個体の光量別 R 点滅光に対する網膜順応度
- 図 3 - 24 虹彩有個体の G30 点滅光に対する網膜順応度
- 図 3 - 25 虹彩除去個体の光量別 G 点滅光に対する網膜順応度
- 図 3 - 26 虹彩有個体の B30 点滅光に対する網膜順応度
- 図 3 - 27 虹彩除去個体の光量別 B 点滅光に対する網膜順応度
- 図 3 - 28 遮光した実験用円形水槽
- 図 3 - 29 LED の各発光色と INC の発光波長分布
- 図 3 - 30 暗順応状態のサンマ網膜(暗環境下に 4 時間馴致)
- 図 3 - 31 明順応へ移行中のサンマ網膜(INC 光 100 分間照射)
- 図 3 - 32 白熱灯光に対するサンマの網膜順応度 経時変化
- 図 3 - 33 LED R 光に対するサンマの網膜順応度 経時変化
- 図 3 - 34 LED G 光に対するサンマの網膜順応度 経時変化
- 図 3 - 35 LED B 光に対するサンマの網膜順応度 経時変化
- 図 3 - 36 第 12 白嶺丸 サンプルング場所 (08 6/5 ~ 9 39 ° 31 N , 135 ° 59 E)
- 図 3 - 37 漁業指導調査船 白山丸 (奥)
- 図 3 - 38 白山丸 サンプルング場所 (08 9/18 ~ 23)
- 図 3 - 39 LED 船上灯および太陽光下でサンプルングしたスルメイカの網膜順応度

08 6/5 ~ 9 SS/19:10 SR/4:35 , LEDon/19:30 LEDoff/4:10

図 3 - 40 LED 船上灯および太陽光下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度
釣獲方法別 順応度と釣獲水深の関係

図 3 - 41 LED 船上灯下でサンプリングしたスルメイカの網膜順応度
前半夜と後半夜の比較

図 3 - 42 LED 水中灯・MH 船上灯および太陽光下でサンプリングした
スルメイカの網膜順応度 24 時間の経時変化 (SS/18:00 SR/5:50)

図 3 - 43 LED 水中灯・MH 船上灯および太陽光下でサンプリングした
スルメイカの網膜順応度 釣獲水深と順応度の関係

図 3 - 44 第 1 太喜丸サンプリング場所 (08 12/1 39° 24' N, 142° 52' E)

図 3 - 45 棒受網操業中にサンプリングしたサンマの網膜順応度 頻度分布

表 3 - 1 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩有, 連続光

表 3 - 2 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩無, 連続光

表 3 - 3 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩有, 点滅光

表 3 - 4 スルメイカ水槽実験 実験条件 虹彩無, 点滅光

表 3 - 5 LED の各発光色と INC の放射照度積分値 (水深 5cm)

表 3 - 6 サンマ 水槽実験 サンプリング条件

表 3 - 7 スルメイカのサンプリング状況 (08 6/5 ~ 6 39° 29' N, 135° 55' E)

表 3 - 8 スルメイカのサンプリング状況 (08 6/7 ~ 8 39° 35' N, 136° 10' E)

表 3 - 9 スルメイカのサンプリング状況 (08 6/8 ~ 9 39° 36' N, 136° 02' E)

表 3 - 10 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸)

08 9/19 ~ 20 39° 22' N, 135° 20' E

表 3 - 11 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸) 08 9/20 39° 19' N, 135° 24' E

表 3 - 12 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸) 08 9/21 39° 15' N, 135° 25' E

表 3 - 13 スルメイカのサンプリング状況 (白山丸)

08 9/23 ~ 24 39° 15' N, 135° 31' E

表 3 - 14 棒受網操業時にサンプリングしたサンマの網膜順応度